

**T.C.**  
**GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EPOKSİ BAZLI POLİMER KAPLAMALARDA FARKLI**  
**RENKLENDİRİCİLERİN YANMA DAVRANIŞINA ETKİSİ**

**CEREN KEZBAN GÜL**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GEBZE**  
**2019**

**T.C.  
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EPOKSİ BAZLI POLİMER  
KAPLAMALARDA FARKLI  
RENKLENDİRİCİLERİN YANMA  
DAVRANIŞINA ETKİSİ**

**CEREN KEZBAN GÜL  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMANI  
DR. ÖĞR. ÜYESİ İLKE ANAÇ**

**GEBZE  
2019**

**T.R.**  
**GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY**  
**GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

**EFFECT OF DIFFERENT COLORANTS ON  
THE BURNING BEHAVIOR OF EPOXY  
BASED POLYMER COATINGS**

**CEREN KEZBAN GÜL**  
**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE**  
**DEPARTMENT OF MATERIALS SCIENCE AND  
ENGINEERING**

THESIS SUPERVISOR  
ASSIST. PROF. DR. İLKE ANAÇ

**GEBZE**  
**2019**

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 03/07/2019 tarih ve 2019/30 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 09/07/2019 tarihinde tez savunma sınavı yapılan 151011003 no'lu Ceren Kezban GÜL'in tez çalışması Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

**JÜRİ**

ÜYE  
(TEZ DANIŞMANI) : Dr. Öğr. Üyesi İLKE ANAÇ

ÜYE : Doç. Dr. KORAY ÖZTÜRK

ÜYE : Doç. Dr. GÜRALP ÖZKOÇ



**ONAY**

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun  
...../...../..... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

## ÖZET

Yapı sektöründe birçok farklı amaçla kullanılan termoset grubundan epoksi polimerler; suya, asit ve alkali maddelere karşı yüksek kimyasal dayanımı, fiziksel yüzey aşınma dayanımı ve diğer malzemelere yüksek yapışma kapasitesinden dolayı liman ve sanayi tesislerinde en çok tercih edilen polimer yüzey koruyucu malzemelerindendir. Bu çalışmada epoksi bazlı polimer kaplamaya sentez aşamasında renklendirme amacıyla eklenen farklı renklerdeki pigmentlerin polimerler kaplamanın yanma davranışlarına etkisinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Türkiye’de yapılar ile ilgili bulunan yönetmeliklerde ve ulaşım sektöründe kullanılan yangın test prosedürleri kullanılarak çeşitli pigmentlerle farklı renklerde elde edilmiş epoksi kaplamaların yanma özellikleri ve karakterizasyonu yapılmıştır. Bu tez kapsamında, epoksi polimerlerin zemin ve taşıt içi kaplamalarında kullanılan çift komponentli, belli zincir yapısı ve molekül ağırlığında çeşidi kullanılarak, standart beyaz, sarı, kırmızı, mavi, siyah ve kırmızı renklerde 3,0 mm kalınlıkta kaplamalar hazırlanmış ve yanma testleri gerçekleştirilmiştir. 50 kW/m<sup>2</sup> ısı altında spesifik optik duman yoğunlukları ve ortaya çıkardığı zehirli gazlar (CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>2</sub>, NO, SO<sub>2</sub>, HCl, HF, HCN, HBr..vs) FTIR yöntemi ile belirlenerek malzemelerin belli ısı akılarında ısı salım hızları (HRR-Heat Release Rate), tutuşma sırasında kritik ısı akıları (CFE-Critical Flux at Extinguishment), sürekli yanma için gereken ısı miktarları (Qsb-Heat for sustained burning) ve en yoğun noktada HRR (Peak HRR) verileri elde edilerek diğer tüm sonuçlarla birlikte analiz edilmiştir. Yanma davranışlarının her pigmentte aynı eğilimde olması ve toplam ısı akısının renge ve konsantrasyona göre değişmemesi ile birlikte ısı salım hızlarının farklı olduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışma ile hem yapı sektörü hem taşımacılık sektöründe geniş çapta kullanılan epoksi polimerlerdeki renk değişiminin yanma davranışına etkisi literatüre ve Avrupa ile eş zamanlı olarak standardizasyona katkı sağlanacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Kaplama, Epoksi bazlı polimer, Pigment, Renklendirici, Yanma, Yangın sınıflandırması, Isı Salım Hızı.

## SUMMARY

Epoxy polymers from the thermoset group used in the construction sector for many different purposes are the most preferred polymer surface protection materials in maritime and industrial facilities with its high chemical and physical surface abrasion resistance against water, acid and alkali materials and its high adhesion capacity to other materials. In this study, it is aimed to determine the combustion behavior of the various colors with different pigments that were added to the epoxy polymer material during the synthesis phase. Using fire test procedures used in related regulations of the construction and transport sectors in Turkey, combustion properties and characterization of epoxy coatings were obtained in different colors with various pigments. Two-component epoxy polymers used in floor and vehicle interior coating with certain chain structure and molecular weight having 3,0 mm thickness were tested in standard white, yellow, red, blue and black colors and with organic additives for red color. Specific optical smoke densities and toxic gases ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{HCN}$ ,  $\text{HBr}$ ) determined by FTIR method in  $50 \text{ kW} / \text{m}^2$ , heat emission rate (HRR-Heat Release Rate), critical heat fluxes (CFE-Critical Flux at Extinguishment) during combustion, the amount of heat required for continuous combustion ( $Q_{sb}$ -Heat for sustained burning) and HRR (Peak HRR) data at peak points and all other results were analyzed. It has been concluded that the combustion behavior has the same tendency in each pigment and the total heat flux does not change according to the color and its concentration however the heat release rates have been displayed in different stages. By this study, the effect of color change on combustion behavior in epoxy polymers widely used in both construction sector and transportation sector will contribute to the literature and standardization with Europe simultaneously.

**Key Words: Coating, Epoxy Based Polymer, Pigment, Colorant, Combustion, Fire Classification, Heat Release Rate.**

## TEŞEKKÜR

2015 yılında başlayıp bugüne kadar yapmak istediğim her çalışmada özgür hissetmemi sağlayarak her açıdan destek olan, gerçek bilimsel çalışmanın her daim takipçisi olarak yola devam edebilmemi sağlayan değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Görevlisi İlke ANAÇ'a,

Konu eğitim olunca doğduğum günden bu güne her türlü engeli önümden kaldıran, bugünlere gelmemi sağlayan ve sonsuz desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen annem Hatice GÜL ve babam Mehmet GÜL'e,

Tez boyunca maddi, manevi tüm yardımları için Emine ÇATMAN ATASOY, Alpay SÜMER ve Osman AYDOĞDU'ya,

Son olarak sabırla her daim yanımda duran ve duracağını bildiğim eşim Güray Muhammed GÜLPINAR'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

# İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa</u></b>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
TABLolar DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	3
1.1. Çalışma Yöntemi	4
2. KURAMSAL TEMELLER	6
2.1. Epoksi Polimerler	6
2.1.1. Polimer Bilgisi	6
2.1.2. Termoplastikler	8
2.1.3. Elastomerler ve Termosetler	9
2.1.4. Yapı Malzemeleri Arasında Polimerlerin Yeri	9
2.1.5. Epoksi Polimerler	13
2.1.6. Epoksi Polimerlerin Isıl Davranışı	17
2.1.7. Epoksilerde Isı Etkisiyle Kimyasal Parçalanma	19
2.1.8. Epoksi Reçinelerde Katkı Maddeleri	23
2.2. Yangın Olayının Dinamikleri	31
2.2.1. Yangın Üçgeni ve Yangın Dörtüzlüsü	31
2.2.2. Yangının Yayılması	33
2.2.3. Yangının Evreleri	34
2.2.4. Yangın Deneyleri	37
2.2.5. Yangına Tepkiye Genel Bakış	38
2.2.6. Tutuşma Kolaylığı	41
2.2.7. Alev Yayılması	42
2.2.8. Yanma Sonucu Açığa Çıkan Isı Rejimi	43

2.2.9. Yanma Sonucu Açığa Çıkan Duman Rejimi	44
2.2.10. Yanma Ürünlerinin Zehirliliği	45
3. DENEYSEL	46
3.1. Kullanılan Malzeme Çeşitleri	46
3.2. Kullanılan malzeme miktarları, hesaplamalar ve uygulamalar	48
3.3. Uygulanan test metotları	54
3.3.1. TS ISO 5660-1 Yangına tepki deneyleri - Isı salınma duman oluşturma ve kütle kayıp hızı - Bölüm 1: Isı salınma hızı (konik kalorimetre yöntemi)	54
3.3.2. TS ISO 5659-2 Plastikler- Duman oluşumu- Bölüm 2: Tek kabin deneyi ile optik yoğunluğun tayini	56
3.3.3. FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) Analizi	58
3.3.4. TS ISO 5658-2 Yangın deneylerine karşı tepkime- Alev yayılması- Bölüm 2: Düşey olarak yerleştirilen yapı ürünlerinde yana doğru yayılma	59
3.3.5. TS EN ISO 1716 Yapı ürünlerinin yangına tepki deneyleri - Yanma ısısının tayini (kalorifik değer)	61
3.3.6. TS EN ISO 4589-2 Plâstikler- Oksijen indisi ile yanma özelliklerinin tayini- Bölüm 2: Ortam sıcaklığı tayini	63
3.3.7. Yüzey Karakterizasyonu	66
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	70
4.1. TS ISO 5660-1 Yangına tepki deneyleri - Isı salınma duman oluşturma ve kütle kayıp hızı - Bölüm 1: Isı salınma hızı (konik kalorimetre yöntemi)	70
4.2. TS ISO 5659-2 Plastikler- Duman oluşumu- Bölüm 2: Tek kabin deneyi ile optik yoğunluğun tayini	74
4.3. FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) Analizi	76
4.4. TS ISO 5658-2 Yangın deneylerine karşı tepkime- Alev yayılması- Bölüm 2: Düşey olarak yerleştirilen yapı ürünlerinde yana doğru yayılma	77
4.5. TS EN ISO 1716 Yapı ürünlerinin yangına tepki deneyleri - Yanma ısısının tayini (kalorifik değer)	79

4.6. TS EN ISO 4589-2 Plâstikler- Oksijen indisi ile yanma özelliklerinin tayini- Bölüm 2: Ortam sıcaklığı tayini	80
4.7. Yüzey Karakterizasyonu	80
5. SONUÇLAR	86
KAYNAKLAR	88
ÖZGEÇMİŞ	91
EKLER	92

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<b><u>Simgeler ve</u></b>	<b><u>Açıklamalar</u></b>
<b><u>Kısaltmalar</u></b>	
ABS	: Akrlonitril-bütadien-stiren kopolimeri
AHRE	: Ortalama ısı salım hızı
CPE	: Klorlanmış polietilen
CFE	: Kritik ısı akısı
EPDM	: Etilen-propilen-dien monomeri
EPE	: Genleştirilmiş polietilen
Epoxy	: Poliepoisit yapılı termoset reçine
EPS	: Genleştirilmiş polistiren
FRP	: Lifle güçlendirilmiş plastikler
HDPE	: Yüksek yoğunluklu polietilen
HRR	: Isı salım hızı
HRRav	: Isı salım hızı - ortalama
GFRP	: Cam lifiyle güçlendirilmiş plastikler
GRP	: Cam ile güçlendirilmiş plastikler
LPDE	: Düşük yoğunluklu polietilen
LOI	: Sınırlayıcı oksijen indisi
PB	: Polibütillen
PC	: Polikarbonat
PCC	: Polimer çimentolu beton
Qpcs	: Toplam brüt yanma ısısı
Qab	: Sürekli yanma için gerekli ısı
PE	: Polietilen
PET	: Polietilentereftalat
PIC	: Polimer empenyeli beton
PIR	: Poliizosiyanürat
PMC	: Polimer modifiye beton
PMMA	: Polimetilmetakrilat
PP	: Polipropilen
PS	: Polistiren

PVC	:	Polivinilklorür
PVDC	:	Polivinilidinklorür
PVC-U	:	Plastikleştirici katılmamış polivinilklorür
PU	:	Poliüretan
SBS	:	Güçlendirilmiş stiren-bütadien-stiren
UF	:	Üre formaldehit
TSE	:	Türk Standardları Enstitüsü
THR	:	Toplam ısı salım hızı
XPE	:	Çapraz bağlı polietilen

# ŞEKİLLER DİZİNİ

<b><u>Sekil No:</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
2.1: Polietilen molekülünün geometrisi.	7
2.2: Farklı yapıdaki polimer zincir dizilişlerinin basit gösterimi.	8
2.3: Amorf ve yarı kristal polimer yapı modelleri.	9
2.4: Basit epoksi halkasının kimyasal yapısı (Etilen Oksit).	13
2.5: R'nin diglisidil eteri.	14
2.6: R'nin diglisidil esteri.	14
2.7: Bisfenol A esaslı epoksi reçinelerin genel oluşum mekanizması.	15
2.8: Okziran grubun birincil amin tepkimesi.	16
2.9: Okziran grubun ikincil amin tepkimesi.	16
2.10: Epoksi ısıl bozunmasında ikincil alkolün dehidrasyonu.	21
2.11: Epoksi ısıl bozunmasında ardıl reaksiyonlar.	22
2.12: Alifatik halka oluşumları.	22
2.13: Yangın üçgeni.	32
2.14: Yangın dörtyüzlüsü.	33
2.15: Yangında açığa çıkan ısının zamana göre değişimi.	35
3.1: Renk pastaları.	50
3.2: Numune altlıklarının ve karışımlarının hazırlanması.	53
3.3: Konik kalorimetre numune hazırlığı.	55
3.4: Konik kalorimetre deney görselleri.	55
3.5: Duman kabini ve FTIR Analizörü.	57
3.6: Duman kabininden FTIR analizi için örnek alınmasının şematik gösterimi.	58
3.7: Yanal alev yayılması deney düzeneğinin şematik gösterimi.	61
3.8: Yanma ısısı deney düzeneğinin şematik gösterimi.	62
3.9: Oksijen indisi numune hazırlığı.	64
3.10: Oksijen indisi işlem A ile numune beyaz 30 deney görüntüsü.	65
3.11: CIE L*a*b* renk düzlemi.	68
4.1: Beyaz pigment konsantrasyonu farklı numunelerin ortalama ısı salım hızı (HRRav) grafiği.	71

4.2:	Beyaz pigment konsantrasyonu farklı numunelerin toplam ısı salımı (THR) grafiği.	71
4.3:	Pigment farklı numunelerin ortalama ısı salım hızı (HRRav) grafiği.	72
4.4:	Pigment farklı numunelerin toplam ısı salımı (THR) grafiği.	73
4.5:	Beyaz pigment konsantrasyonu farklı beyaz numunelerin karşılaştırması.	74
4.6:	Pigment farklı renkli numunelerin duman yoğunluğu karşılaştırması.	75
4.7:	Numunelerin 5x ve 20x büyütme oranlarında optik mikroskop görüntüsü.	82
4.8:	Beyaz 70 ve Beyaz 90 numunelerde gözenek ölçümleri.	83
4.9:	Beyaz 50 ve sarı oksit numunelerinin yanma artıkları.	84

# TABLolar DİZİNİ

<b><u>Tablo No:</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
2.1: Uygulama alanlarına göre yapılarda kullanılan polimerlere örnekler.	10
2.2: Yapı malzemelerinin TS EN 13501-1 standardına göre yangına tepki sınıfları, performans açıklamaları, temsil edilen yangın senaryoları ve örnek ürünler.	39
2.3: Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik'in güncel sürümünde Ek 2ç bölümünde ifade edilen döşemeler dışındaki yapı malzemeleri için yanıcılık sınıfları.	40
3.1: Tüm numunelerde kullanılan ortak malzemeler.	47
3.2: Renklendirici pasta içinde kullanılan pigment miktarları.	49
3.3: Numune hazırlığında kullanılan altlık malzemenin özellikleri.	51
3.4: Standart metotlar ve altlık/numune miktar ve boyutları.	51
4.1: Pigment konsantrasyonu farklı numuneler – Gözlemler.	70
4.2: Pigment konsantrasyonu farklı numuneler - Isı salımı.	70
4.3: Pigment farklı numuneler – Gözlemler.	72
4.4: Pigment farklı numuneler – Isı salımı.	72
4.5: Tüm numune tipleri için zehirli gaz değerleri.	76
4.6: Pigment konsantrasyonu farklı numuneler için CFE ve Qsb değerleri.	77
4.7: Pigment farklı numuneler için CFE ve Qsb değerleri.	78
4.8: Tüm numune tipleri için brüt yanma ısısı değerleri.	79
4.9: Tüm numune tipleri için oksijen indisi değerleri.	80
4.10: Tüm numune tipleri için sertlik değerleri.	80
4.11: Tüm numune tipleri için referans renklerle L*a*b değerleri.	81

# 1. GİRİŞ

Polimerlerin insan yaşamında hemen her alanda kullanılması tarih kadar eskidir. Genellikle bitki özleri olan doğal polimerlerin sağlamlığından ve esnekliğinden faydalanarak ahşap alet ve yapılar inşa etmek ve bunları geliştirmek çağlar boyunca, mühendisliğin ve genel anlamda teknolojik gelişmelerin odak noktasında yer almış, insan hayatı içindeki yeri antik çağlardan günümüze kadar önemini yitirmeden gelecek kadar da sağlamdır.

Günümüzde genel kültüre dair kabul edilen bilimsel gelişmelerin çoğu gibi polimer biliminin ortaya konması da 20. yüzyılda gerçekleşmiştir [1]. O zamana kadar kullanılan naylon gibi yapay polimerlerin varlığından bahsetmek mümkündür, ancak bu gelişmeden sonra amaca yönelik üretilen plastik ve elastomerik malzemeler bugün tüm endüstri sektörlerinin vazgeçilmez ham maddeleri haline gelmiş durumdadır.

Polimerlerin henüz inşaat sektöründe geleneksel yapı malzemeleri karşısında tam olarak kabul görmediği ortada olmakla birlikte, 2016 yılı itibariyle Avrupa'da endüstri sektörlerinin polimer tüketimlerine bakılacak olursa ambalaj ve paketleme sektörünün hemen arkasında yılda 9,4 milyon ton ile yapı malzemelerinde görülür [2].

Polimerler yapının birçok yerinde yapısal ve yapısal olmayan çeşitli kullanım alanlarına sahiptir, çünkü uzun süreli ve oldukça az sorunlu çözümler sundukları bilinmektedir. Hafiflik avantajı ve ağırlıklarına kıyasla mükemmel sağlamlık ve amaca yönelik olarak, sertlik veya esneklik sunabilirler. Plastik ve diğer elastomerler genel olarak kolay montaj ve kurulum olanağının yanında uygun maliyetli ve düşük bakım gerektiren çözümleri mümkün kılar.

Modern yapılarda çeşitli polimer malzemelerin iç ve dış uygulamalarına rastlamak sıradan hale gelmiştir. Bu uygulamalar mimari özellikleri geliştirmenin yanında enerji korunumu açısından da eşsiz avantajlar sağlamaktadır. Isı, su, ses, elektrik yalıtımı ile döşeme, boru ve kanallar polimerlerin yapılardaki ilk akla gelen kullanım alanlardır. Pencere profilleri, kapılar, contalar, süngerler, membranlar, giydirme dış cepheler, zemin kaplamaları, çitler, havuz kenarlıkları, izolasyon köpükleri, titreşim azaltıcı tamponlar ve daha birçok örnek baskın olarak, plastik ve lastikten yapılmaktadır. Kolay şekil verilebilmeleri, üç boyutlu yazıcılar yardımıyla başka türlü imkansız olan tasarımları kolaylıkla hayata geçirmekte kullanılabilmeleri

sayesinde restorasyon ve eskiye uydurma çalışmalarında da vazgeçilmez hale gelmişlerdir [3].

Polimer yapılı malzemelerin ve bunların bileşen olarak yer aldığı kompozit ürünlerin yavaş yavaş geleneksel yapı malzemelerinin yerine geçmesi, yapılarda bu denli yoğun kullanılması, bütün mekanik ve tasarım odaklı avantajlarının yanında, çok önemli bir riski de beraberinde getirmektedir. Çimento, çelik, cam, doğal taşlar gibi geleneksel yapı malzemeleri çoğunlukla yangına karşı dayanıklı ürünlerdir. Ahşap gibi yangına dayanıklı olmayanların ise hem yangın karşısında gösterdikleri davranış tarihsel olarak bilindiği için hem de bu malzemelerin kapasiteleri belli olduğu için kullanımları bugüne kadar ya kısıtlanmış ya da risk altında olduğu bilinerek aktif önlemler alınmasını sağlamak mümkün olmuştur. Diğer tarafta son yıllarda, büyük çaplı binaların dahi içinde ve dışında tonlarca yanıcı polimer malzeme kullanılması gibi örnekler bu tarihsel düşünce sürecinden geçmeden ortaya çıkmıştır. Bu uygulamaların ortak noktası, karşı karşıya kalınan riskin hiç öngörülmemiş olması veya daha kötüsü pratik uygulama ve estetik için güvenliğin ikinci plana atılmasıdır.

Böyle bir süreç sonucunda ortaya çıkan çok çarpıcı bir örnek 2012 yılının Temmuz ayında İstanbul'da yaşanan, Polat Tower binasının dış cephesini kavuran yangındır. Bu yangın koskoca bir gökdelenin bütün dış cephesinin yanarak tüm çevreye ve içindekilere ölüm saçabileceğinin ciddi bir göstergesidir. Yangında can kaybının olmaması içerideki insanların olaya çabuk ve doğru tepki vermedeki başarıları; yangının ulusal bir felaket haline gelmeden kontrol altına alınması ise tamamen canını dişine takan itfaiyecilerimizin gayreti sayesinde. Olayın bu denli büyümesinin tek sorumlusu ise dış cephede bol miktarda kullanılan ve çok yanıcı bir malzeme olan polistirendir [4, 5].

İnsanlar toplumsal yaşama geçtiğinden beri, gerek doğal, gerek yapay kaynaklı yangınlardan çok zarar görmüştür. Bu durum global dünyada güvenlikle ilgili risklerin ve hassaslıkların artması ile birlikte kendini güncel yönetmelik ve diğer yasal belgelerin içinde göstermiştir. Yangın güvenliği, ülkemizdeki de dâhil olmak üzere güncel yapı yönetmeliklerinde, kendine yapı güvenliğinin ana bileşenlerinden biri olarak yer bulmuştur.

Yangın güvenliği genel olarak iki ana parçada incelenir. Aktif ve pasif önlemler olarak nitelendirilebilecek bu iki parçanın aktif bölümü ortaya çıkan bir yangının baskılanması ve kontrol altına alınmasını, pasif bölümü ise yangının çıktığı yerde büyümemesi veya kendi kendine sönmesi, büyürse de belirli bir alanın dışına belirli

bir süreyle çıkmaması ile ilgili mimari ve malzeme bilimi ile alakalı uygulamaları içerir [6]. Aktif önlemler düşünülürken bina yapımında kullanılan malzemeler göz önüne alınarak tasarım yapılmakla birlikte, binalardaki yanıcı malzemeleri ve bunlarla ilgili yapılabilecek çalışmaları esas ilgilendiren bölümün pasif koruma olduğunu söylemek yanlış olmaz. Bu noktada, bilinen ve endüstride kullanılan hiçbir organik polimerin, her ne kadar yangın karşısındaki tepkileri “yangın geciktirici” adı verilen çeşitli katkılarla geliştirilse de, yanmaz özellikte olmadığına altını çizmek gereklidir. Bu bağlamda polimer esaslı ürünlerin yapılarda kullanılmasının önündeki en önemli engelin yangın durumundaki davranışları olduğu anlaşılmaktadır.

Pasif yangın güvenliğinin, olası bir yangın durumunda bir malzemenin yanması sonucu açığa ne kadar ısı çıkaracağı, yangının gelişimine nasıl bir etkisi olacağı ile ilgilenen branşına “Yangına Tepki” ismi verilir. Genel olarak ilgili literatür incelendiğinde polimer esaslı malzemelerin zamanla yapı malzemesi olarak kabul görmesinin ve sundukları avantajlarla binalarda özgürce kullanılabilmelerinin yolu yangına tepki davranışlarının incelenmesinden ve detaylı şekilde ortaya konmasından geçmektedir. Yeni üretilecek ve yalnız başına kullanılacak ya da kompozit yapılar içine yerleştirilecek ürünlerin tasarlanması konusunda böyle çalışmaların endüstriyel bilgi dağarcığı içinde yer alması araştırma geliştirme aşamasında gereksiz kaynak kayıplarının önüne geçilmesini sağlar.

## 1.1. Tezin Amacı

Geleneksel yangın güvenliği bilinci Türkiye coğrafyasında itfaiye kuruluşları, ve yangın durumunda seferberlik ilanlarıyla 15. yüzyıldan bu yana günlük hayatın bir parçasıdır. Ancak modern yangın güvenliği kavramlarının bizim için, bu konuda uzun yıllardır çalışma yapan bir grup öncü ülkeyle karşılaştırıldığında, görece çok yeni olduğunu söylemek yanlış olmaz. Bu sebeple, birçok kavram halen üretim ve araştırma geliştirme alanlarında dahi yanlış bilinmektedir. Konuyla ilgili ciddi bir Türkçe kaynak eksikliği vardır.

Türk Standardları Enstitüsü, 2002 yılında Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik’in ilk defa mevzuata girmesi ile yapı malzemelerinde yangına tepki deneylerinin gerçekleştirilmesi, konunun ilgili sektörlerce tanınması ve geliştirilmesi adına hızlı adımlar atarak Türkiye’de bu yeni anlayışın öncüsü olmuştur.

Bugün gelinen noktada, hızlı ve yerinde reaksiyon vererek elde edilen hareket sayesinde, sürekli bir gelişme halindeki uluslararası yangın test hizmetleri ve standartlarını yakalamayı başarmış durumdadır. Sadece rutin testleri doğru ve yerinde yapıyor olmak teknolojik gelişmeleri ve global güvenlik kaygılarını, ancak, takip etmeyi kolaylaştırmaktadır. Hem düşünsel hem de pratik üretici pozisyonuna geçmek ancak teknolojiyi bıraktığımız yerden itibaren yansıtan akademik çalışmalarını takip etmekle mümkündür.

Bu tez çalışması, anlatıldığı gibi, ülkenin teknik bilgi dağarcığına katkıda bulunmak; gelecekte polimer araştırmaları ve yangın sektörünün Türkiye’de akademik anlamda var olmasını sağlayabilecek disiplinler arası bir bağ kurmak; laboratuvarında standart deneylerin yanında araştırmaya dayalı çalışmaların yapılması alışkanlığını geliştirmek; yangına tepki ve özellikle epoksi polimerlerin yangına tepki performansları ile ilgili Türkçe kaynak eksikliğini bir nebze olsun azaltmak amacıyla hazırlanmıştır.

Ayrıca polimer malzemelerde belirli fonksiyonel grupların mikro ölçekte molekülün ısıl kararlılığın arttırdığı bilinmekle birlikte hâlihazırda devam eden test metodlarında epoksi polimerlerde dâhil olmak üzere genel polimer malzemelerde renk değişikliğinin yangın sınıflandırmasına etkisi bilinmemektedir. Isıl kararlılık kulağa yanmaya karşı dirençle paralel değişim gösterecek bir değişken gibi geldiği halde, yangın olayı yüzey özelliği, dış ısıl etkiler, oksijen beslemesi, kömürleşme eğilimi gibi birçok çevresel ve içsel etkiye bağlı bir süreçtir. Bu çalışmada, epoksi kaplamaların, renk dışında ilgili değişkenlerin etkisini göz önünden kaldırarak, belli yangına tepki deneylerinde gösterdikleri performansın incelenmesi ve karşılaştırılmasını içeren literatür çalışmasına paralel olarak deneysel olarak yanma rejimi ve yangın sınıflandırması incelenmesi de planlanmıştır.

## **1.2. Çalışma Yöntemi**

Bu tez çalışması kapsamında literatür taraması dahilinde 1990 sonrasında hazırlanmış, güncelliğini koruyan kitaplar ve makaleler ile son yıllara ait rapor ve istatistikler değerlendirilmiştir. Literatür taramasında Google tarafından taranan e-kitaplar, Google Scholar, SCI ve Scopus tarafından taranan bilimsel dergilere başvurulmuştur. Ayrıca Türk Standartları Enstitüsü Kütüphanesi, Gebze Teknik

Üniversitesi Kütüphanesi ile Avrupa Standardizasyon Birliği envanterinde bulunan standartlar ve diğer basılı kaynaklar incelenmiştir.

Yangına tepki performansı ile ilgili incelemeler plastikler için kullanışlı oldukları değerlendirilen “TS EN ISO 4589-2: Yanma davranışının oksijen indisi ile belirlenmesi”, “TS EN ISO 1716: Yanma ısısının belirlenmesi” ve “TS ISO 5660-1 ve TS ISO 5660-2: Koni kalorimetre kullanılarak ısı salım hızı, duman üretim hızı ve kütle kaybetme hızı belirlenmesi” standart deney yöntemleri ile elde edilen sonuçlar üzerinden yapılmıştır [7]. Bunlara ek olarak, malzemelerin brüt yanma ısısı değerleri için bomba kalorimetri yöntemi sonuçları dikkate alınmıştır.

Çalışma kapsamında verilerin kaydedilmesi ve işlenmesi için Microsoft Excel yazılımlarından faydalanılmıştır. Şekillerde sunulan kimyasal gösterimlerin çizilmesinde MarvinSketch yazılımı kullanılmıştır. Belirlenen deney metotları üzerinden analize ek olarak endüstriyel son kullanımda önem arz eden yüzey özelliklerinden olan sertlik, renk ölçümü ve optik mikroskop ile karakterize edilmiştir.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

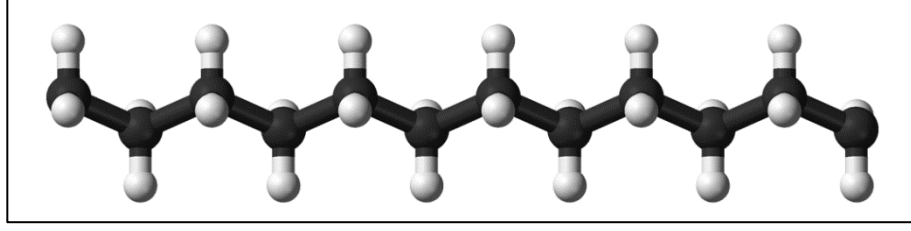
Çalışmanın bu bölümünde, literatürde tespit edilen çalışma ve kuramlarla ilişkilendirilerek, genel bilgilerden başlayıp tez konusunun daraltılmış kapsamına doğru giden bir işleyişle teorik bilgiler sunulacaktır. Öncelikle polimerlere, detay olarak epoksi polimerlere, epoksi polimerlerin yapı malzemesi olarak kullanılmalarına, ısıl parçalanmalarına değinilecek, sonra yangın olayı ile temel yangına tepki analiz yöntemleri açıklanacak ve çalışma kapsamında odaklanılan yöntem ve hazırlanan epoksi kaplamaların detaylarına yer verilecektir.

### 2.1. Epoksi Polimerler

#### 2.1.1. Polimer Bilgisi

Polimer kelimesi Yunanca'da "poly" ve "mer" kelimelerinin birleşiminden oluşur. Poly- çok sayıda, -mer ise parçalar anlamına gelmektedir. Bu isimlendirmenin polimerlerin yapısına oldukça iyi bir açıklama getirdiği söylenebilir.

Polimerler çok sayıda küçük molekülün bir araya gelmesi ile oluşmuş, yapı üzerinde tekrar eden birimlerden meydana gelen büyük boyutlu moleküllere denir. Polimerler en yaygın ve bilinen makromoleküllerdir. Uygun koşullar altında küçük boyutlu moleküller polimerizasyon tepkimesi adı verilen kimyasal değişimler sonucu kendi aralarında kovalent bağlar kurarak polimerleri oluştururlar. Polimerlerin bu küçük yapı taşlarına monomer adı verilir. n sayıda küçük molekül birbirlerine ardarda dizilecek şekilde kovalent bağlarla bağlanır ve uzun, zincire benzer bir makro yapı oluşturur. Ancak polimer zincirlerinin iskeletini oluşturan karbon atomlarının dümdüz bir düzende yan yana dizildiğini düşünmek yanlış olur. Çünkü aslında polimer molekülleri çok çeşitli geometrilere karşımıza çıkabilmektedir. Oldukça basit yapılı bir polimer olan polietilen bile dört bağ yapan karbon atomlarının  $sp^3$  hibritleşmesinden ötürü, aslında uzayda Şekil 2.1'de gösterildiği gibi durmaktadır [9].



Şekil 2.1: Polietilen molekülünün geometrisi.

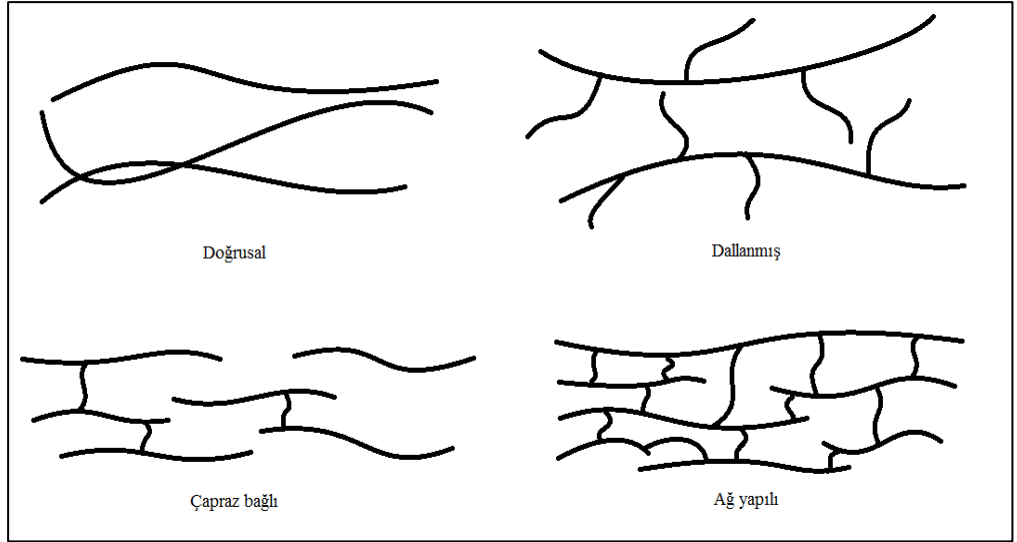
Polimerler kaynaklarına göre doğal ve yapay olarak iki ana grupta değerlendirilir. Amber, ipek, selüloz, yün ve doğal kauçuk, DNA, RNA biyomakromolekülleri gibi malzemeler biyolojik sistemler tarafından sentezlenen doğal polimerlere örnektir. Diğer tarafta sentetik kauçuk, naylon, teflon, PVC, polietilen, polipropilen, silikon gibi isimlerle anılan, insan eliyle üretilmiş yapay polimerler bulunmaktadır.

Çoğunlukla, polimerin birbirine bağlı atomlardan oluşan iskeleti karbon atomlarından meydana gelir. Silisyum, bor gibi atomların da benzer iskeletler teşkil ederek polimer yapılar oluşturdukları bilinmektedir. Ayrıca bu elementlerin yanında oksijen ve azot atomlarına da çeşitli polimer iskeletlerinde rastlamak mümkündür.

İskelet yapısına eklenen gruplarda ise çeşitlilik oldukça fazladır. Organik moleküllerin kimyasal reaksiyonlarında belirleyici taraf olan böyle ek parçalara fonksiyonel grup adı verilir. Ayrıca fonksiyonel gruplar, kimyasal reaksiyonlardaki bu baskın özelliklerinin yanında yarattıkları sterik ve elektronik etkiler dolayısıyla polimerin geometrisini de etkiler.

Polimerleri başka kimyasal malzemelerden ayıran en temel özellikleri büyük moleküller olmalarından dolayı kazandıkları mükemmel fiziksel özelliklerdir. Fiziksel davranışları gereği maddenin katı hali altında yer alan polimerlerin bahsi geçen enteresan özelliklerini baskın şekilde zincir biçimleri etkiler. Zincirler polietilendeki gibi doğrusal, dallanmış veya çapraz bağ yapmış durumda dizilebilirler. Moleküldeki çapraz bağ miktarının fazla olduğu polimerlere ağ yapılı polimerler adı verilir (Şekil 2.2) [9].

Doğrusal ve dallanmış zincir yapısındaki polimerler uygun çözücüler kullanılarak çözünebilir veya kolaylıkla eritebilir. Diğer tarafta ağ yapılı bir polimerin yapısını kazandıktan sonra erimesi veya çözünmesi mümkün değildir. Zincir biçimlerine göre polimerleri termoplastikler, elastomerler ve termosetler olarak üç ana gruba ayırmak mümkündür [9].

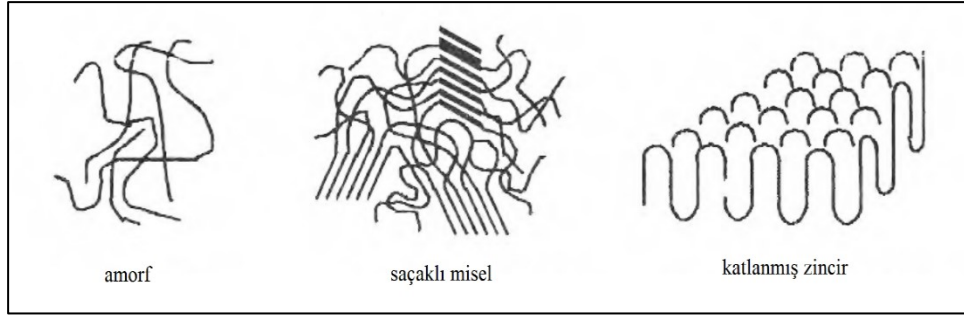


Şekil 2.2: Farklı yapıdaki polimer zincir dizilişlerinin basit gösterimi.

### 2.1.2. Termoplastikler

Plastik çok çeşitli sentetik veya yarı-sentetik, işlenebilen ve/veya katı cisimler şeklinde kalıplanabilen organik bileşiklere verilen isimdir. İsim Yunanca kalıplanmış anlamına gelen “plastos” kelimesinden türemiştir. Termoplastikler bu anlamı tam olarak taşıyan polimer grubudur. Doğrusal ve dallanmış zincirlerden meydana gelirler ve bu sayede ısı etkileriyle kolayca eritilip kalıplanabilir ya da yumuşatılarak işlenebilirler. Ayrıca uygun çözücüler içinde de çözünebilirler.

Plastiklerin içinde polimer moleküllerinin yerleşimine göre üç çeşit yapıdan bahsetmek mümkündür; amorf, kristal ve yarı kristal. Amorf polimerlerde yapıdaki zincirler rastgele yerleşmiş durumdadır. Kristal polimerler zincirleri arasındaki ilişki ise net bir düzen gösterir. Genellikle polimer malzemeler bu iki yapıyı bir arada bulundurur ve bunların yarı kristal halde oldukları söylenir. Böyle bir genelleme yapılabildiği için kristal plastikler dendiği zaman bu ifade yarı kristal olanları da kapsar. Şekil 2.3'te [9] amorf yapı ve kristalleşme oranı farklı iki yapı modeli olan saçaklı misel ve katlanmış zincir modelleri basitçe görsel olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.3: Amorf ve yarı kristal polimer yapı modelleri.

Polimer sentezinde kristalleşme oranı önemli bir değişkendir. Polimerde kristalleşme moleküldeki dallanma miktarına, molekül içi ve moleküller arası etkileşimlere ve sentez şartlarına bağlıdır.

### 2.1.3. Elastomer ve Termosetler

Elastomerlere sıklıkla kauçuklar da denir. Çok özel bir yetenekleri vardır; çekildiklerinde molekülleri birbiri üzerinden kayarak uzaklaşır ve malzeme ciddi bir uzama gösterir ve bu çekme kuvveti ortadan kalktığı zaman da başlangıçtaki formlarını geri kazanırlar. Böyle bir dönüşüm yapabilmelerinin nedeni molekülleri arasındaki sık olmayan çapraz bağlardır. Yapılarındaki çapraz bağlardan ötürü elastomerler erimeye direnç gösterirler ve erime başlamadan ısıl bozunmaya uğrarlar.

Termosetler ağ yapılı polimerlerdir. Yapısal bütünlüklerini kazandıktan sonra eritilemezler. Elastomerlere benzer şekilde ısıl etkiye maruz kaldıklarında parçalanırlar. Bu nedenle üretildikten sonra tahribatsız işlenmeleri söz konusu değildir. Üretimin ilk aşamasında, reçine denilen akışkanlığı düşük kıvamda bir karışım halinde tutulurlar. Reçine içinde ön polimer denen kısmen polimerleşmiş monomerler ve diğer katkıları bulunur. Termoset reçine kalıplandıktan sonra çoğunlukla ısı veya ışık etkisiyle tam polimerleşme sağlanarak son halini alırlar.

### 2.1.4. Yapı Malzemeleri Arasında Polimerlerin Yeri

Bilindiği kadarıyla polimerlerin inşaatlarda yapı malzemesi olarak kullanılması oldukça eskiye, M.Ö. 4. binyılda Babil'in duvarlarının yapıldığı kil tuğlaların harçlarına doğal bir polimer olan asfalt katılmasına kadar dayanmaktadır [10]. Bundan

sonra da tarih devirleri boyunca asfalt, bitüm, amber gibi doğal polimerler hazırlanan çeşitli harçların parçaları olmuştur.

20. yüzyılda malzeme biliminin önem kazanması, kimyadaki tarihte görülmemiş gelişmelere paralel olarak polimer biliminin ortaya çıkması sonucunda malzemelerin özellikleri daha iyi anlaşılmış, özel amaçlara uygun polimerlerin tasarlanması ve üretilmesi mümkün hale gelmiştir.

Bugün geldiğimiz noktada polimerlerin yapı endüstrisinde vazgeçilmez ve yeri doldurulmaz bir konumda olduğu tartışılmaz bir gerçektir. Fiyat/performans oranı çok yüksek katkı maddelerinden sabitleme elemanlarına, tesisat borularından zemin kaplamalara kadar birçok yapı parçası polimer yapıdır. Bu çeşitliliği gösterebilmek amacıyla Tablo 2.1’de yapılardaki uygulama alanları ve bu uygulamalarda yaygın kullanılan polimerlere örnekler sunulmuştur [11,12].

Tablo 2.1: Uygulama alanlarına göre yapılarda kullanılan polimerlere örnekler.

Uygulamalar	Kullanılan Polimerik Malzeme Örnekleri
Cam sistemleri (Glazing)	<ul style="list-style-type: none"><li>• Polimetilmetakrilat (PMMA)</li><li>• Polikarbonat (PC)</li><li>• Cam ile güçlendirilmiş plastikler (GRP)</li></ul>
Çatı sistemleri	<ul style="list-style-type: none"><li>• Polivinilklorür (PVC)</li><li>• Klorlanmış polietilen (CPE)</li><li>• Polivinilidenklorür (PVDC)</li><li>• GRP</li><li>• PC</li><li>• Etilen-propilen-dien monomeri (EPDM)</li><li>• Genleştirilmiş polistiren (EPS)</li><li>• Güçlendirilmiş Stiren-bütadien-stiren (SBS)</li></ul>
Cephe kaplama	<ul style="list-style-type: none"><li>• GRP</li><li>• PVC</li><li>• Plastikleştirici katılmamış PVC (PVC-U)</li><li>• Asetonitril-bütadien-stiren kopolimer (ABS)</li></ul>
Asma tavan sistemleri	<ul style="list-style-type: none"><li>• PMMA</li><li>• GRP</li><li>• Polistiren (PS)</li><li>• PC</li></ul>
Duvarlar ve ayırıcılar	<ul style="list-style-type: none"><li>• GRP</li><li>• Polipropilen (PP)</li><li>• PVC</li><li>• PC</li><li>• EPS (Dolgu ve izolasyon malzemesi olarak)</li></ul>
Kapılar ve pencere çerçeveleri	<ul style="list-style-type: none"><li>• PVC</li><li>• ABS</li><li>• Cam lifiyle güçlendirilmiş plastikler (GFRP)</li></ul>
Contalar ve yapıştırıcılar	<ul style="list-style-type: none"><li>• Poliüretan (PU)</li><li>• Poliepoksit (Epoxy)</li></ul>

Tablo 2.1: Devam.

Boyalar	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Akrilik esaslı boyalar</li> <li>• Silikon esaslı boyalar</li> <li>• PU</li> <li>• Poliepoisit (Epoxy)</li> </ul>
Duvar kâğıtları	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PVC</li> <li>• PU</li> </ul>
Yapısal olmayan ısı yalıtım malzemeleri	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PU köpük</li> <li>• EPS</li> <li>• Genleştirilmiş polietilen (EPE)</li> <li>• PVC</li> <li>• Poliizosiyanoürat (PIR)</li> <li>• Üre formaldehit (UF)</li> </ul>
Akustik ve sismik yalıtım malzemeleri	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kauçuk laminatları</li> <li>• Polifenilen oksit (PPO)</li> <li>• UF, PU, PUR, PS köpükleri</li> </ul>
Elektrik yalıtımı	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PVC, PE ve PP</li> </ul>
Yapısal köpük elemanlar ve sandviç paneller	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PIR, PUR, PE, PP, PPO, PC, ABS, PS köpükleri</li> </ul>
Su izolasyon folyoları	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PE ve PP</li> <li>• PVC</li> <li>• Naylon</li> <li>• Polietilentereftalat (PET)</li> </ul>
Su tesisatı	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PVC ve PVC-U</li> <li>• PE ve PP</li> <li>• ABS</li> <li>• GRP</li> <li>• Polibütülen (PB)</li> <li>• Çapraz bağlı PE (XPE, yer ısıtma sistemleri için)</li> </ul>
Döşeme ve karolar	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PVC ve farklı kopolimerleri</li> <li>• Epoxy</li> <li>• PU</li> </ul>
Betonarme	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Polimer modifiye beton (PMC)</li> <li>• Polimer çimentolu beton (PCC)</li> <li>• Polimer empenyeli beton (PIC)</li> <li>• Lifle güçlendirilmiş plastik (FRP)</li> </ul>
Asfalt ve çimento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Doğal, yapay ve geri dönüştürülmüş kauçuk granüller</li> </ul>
Ahşap ikamesi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PET</li> <li>• Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE)</li> <li>• Düşük yoğunluklu polietilen (LDPE)</li> <li>• ABS-PVC kompozitleri</li> <li>• Belirtilen malzemelerin ahşap yongalarla karışımları</li> </ul>
Jeotekstil, jeomembran, jeomatris ve jeofileler	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PP</li> <li>• HDPE</li> <li>• PVC</li> </ul>

Tablo 2.1: Devam.

Çitler, kenar döşemeleri ve trabzanlar	• PVC ve PVC-U
Yüzey kaplamaları	• Termoset polyesterler
Eskiye uydurma ve restorasyon	• Lifle güçlendirilmiş termoset epoxy ve polyester reçineler

Uzun yıllardır yapı malzemeleri sektörü dünyadaki plastik tüketiminde ambalaj ve paketleme sektörünün ardından ikinci sırada yer almaktadır. Plastik üretim sektörü için düzenli tutulmuş Avrupa Birliği genelindeki istatistikler incelendiğinde, ki AB'nin plastik sektöründeki büyük payından ötürü bu istatistiklerin Dünya genelindeki trendi de yansıttığı söylenebilir; 1999 yılında tüm plastik tüketiminin %18'inden yapı malzemeleri sektörünün sorumlu olduğu, 2006-2015 yılları için bu rakamın %20'nin biraz üzerinde dengeye gelmiş olduğu görülür. Piyasa payındaki bu büyük oranların karşılık geldiği mutlak değerler daha da çarpıcıdır. AB genelinde yapı malzemeleri sektörü 1999 yılında yaklaşık 6 milyon ton, 2015 yılında ise yaklaşık 9,4 milyon ton plastik tüketmiştir [2, 13]. Daha önce de ifade edildiği üzere, plastik ürünler yalıtım alanında çok baskın konumdadır. Enerji verimliliğinin artırılmasının güncel bir endişe olduğu göz önüne alındığında, bu rakamların ileriki senelerde daha da yükselmesi beklentisi rasyoneldir.

Geleneksel olarak yapılarda yer alan ahşap ve bitki yan ürünlerinin, korkunç bir hızla yükselen dünya nüfusunun ihtiyaçlarına cevap vermeye çalışırken, kıt kaynaklar haline gelmeye başlamaları maliyetlerini her geçen gün arttırmaktadır. Bu ürünlerin yerine geçebilecek yapay polimer alternatiflerin ise üretim miktarları artmakta, üretim süreçleri daha verimli hale gelmekte, araştırma geliştirme maliyetlerinin pastadaki payı ise azalmaktadır. Polimerlerin doğal ürünler karşısındaki ekonomik avantajları da doğal olarak hızla artmaktadır.

Maliyet avantajlarının yanında plastikler genellikle çok iyi bir ağırlık-mukavemet oranı sunar, alternatif oldukları uygulamalara göre çok daha az ustalık gerektirir. Bu yönleriyle de plastikler çevre şartlarına direnç konusunda yapıları güçlendirme amacıyla olan mühendislerin ve ev sahiplerinin de zorunlu olarak en çok başvurdukları alternatifler konumundadır.

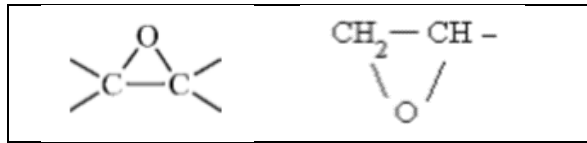
Diğer taraftan, modern yapılarda kabul gördükleri 1970'li yıllarda yalnızca bir grup malzemenin ikamesi olarak kullanılan polimer esaslı malzemeler, özellikle lifle güçlendirilmiş kompozitlerin gelişmesi ile çok daha karmaşık ana sistem elemanları

olarak mühendislik yapılarında yer bulmuştur. 2008 yılı itibariyle tamamen plastikten imal edilmiş tek parça bir köprüden bahsetmek bile mümkündür [14]. Yine 2008 yılındaki Olimpiyat Oyunları dâhilindeki su sporu müsabakaları için Pekin’de inşa edilen ve “Su Küpü” ismiyle anılan akıllı yapının tüm duvarları etilentetrafloroetilen (ETFE) polimerinden yapılmıştır. Hesaplamalara göre bu yapı su küpüne %30’luk bir ek enerji verimliliği kazandırmaktadır [15].

Sonuçta, polimer yapıları malzemeler inşaat sektörüne hali hazırda çok çeşitli yapısal, dekoratif, yüksek enerji verimliliğine sahip, akıllı malzeme çözümleri sunmaktadır. Kompozit malzemelerin gelişmesiyle plastikler kısa sürede çok yaygın kullanılan ham maddeler haline almıştır. Ayrıca tüm işaretler gelecekte polimerlerin binalarda kullanım sıklığının artacağı ve hatta çok da uzak olmayan bir gelecekte geleneksel yapı malzemeleri olarak kabul göreceğini göstermektedir.

### 2.1.5. Epoksi Polimerler

Epoksi reçineler polimer malzemelerin ve yapı malzemesi olarak kullanılan polimerlerin önemli bir sınıfı olup yapılarında üç elaman bulduran ev epoksi, epoksit, oksiran veya etoksilen adı verilen bir halka yapı barındırmalarıyla bilinirler [16]. En basit yapıdaki bir halka epoksi grubu aşağıdaki figürlerde gösterilmiş olan ‘alfa epoksi’ ya da ‘1,2-epoksi’dir ve genel olarak çok daha kompleks epoksilerin yapı taşı oluşturur.

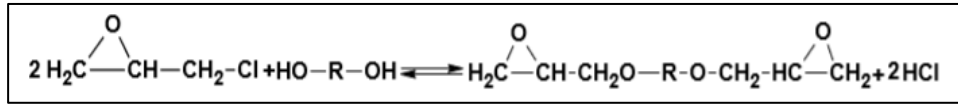


Şekil 2.4: Basit epoksi halkasının kimyasal yapısı (Etilen Oksit).

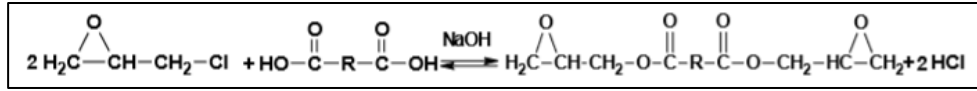
Epoksi kelimesi köken olarak Yunanca üzerinde, arasında anlamına gelen “ep” ön eki ve oksijenin bileşen formunda anlamına gelen “oxy” kelimelerinin birleşiminden oluşmuştur. (epoksi resin) Tam anlamıyla ise epoksi reçineler sadece çapraz bağlanmış monomerlere veya epoksi grupları içeren oligomerlere karşılık gelir. Bununla birlikte, uygulamada, epoksi reçineleri terimi, kürlenmiş epoksi sistemlerini kapsayacak anlamda kullanılmaktadır. Çok yüksek molekül ağırlıklı epoksi reçinelerinin ve sertleştirilmiş epoksi reçinelerinin çok az epoksit grubu içerdiği veya

hiç bulunmadığı bilinmelidir. Endüstriyel olarak önemli olan epoksi reçinelerin büyük çoğunluğu iki veya çok fonksiyonlu epoksitlerdir. Monofonksiyonel epoksitler öncelikle reaktif seyrelticiler, viskozite modülleri veya yapışkanlık (adezyon) düzenleyicileri olarak kullanılırlar ancak epoksi polimerlerin alanlarındaki bağ nedeniyle buraya dâhil edilirler. Diğer bir deyişle epoksi reçineler yapısında tepkimeye girme potansiyeline sahip iki veya daha fazla epoksit grubu barındıran sentetik gruplardır.

Epiklorohidrin (ECH) daha bilenen adıyla klorometil oksiranın, oynak H atomları barındıran hidroksil veya karboksil gruplarını içeren bileşiklerle tepkimeye sokularak sırasıyla glisidil eter veya glisidil ester yapılarının oluşturulması sonucunda elde edilen ürün epoksi reçinedir. Şekil 2.5 ve Şekil 2.6'da [17] türlerden ilki ve diglisidil eter yapılı olan en çok kullanılan reçine türüdür.



Şekil 2.5 R'nin diglisidil eteri.

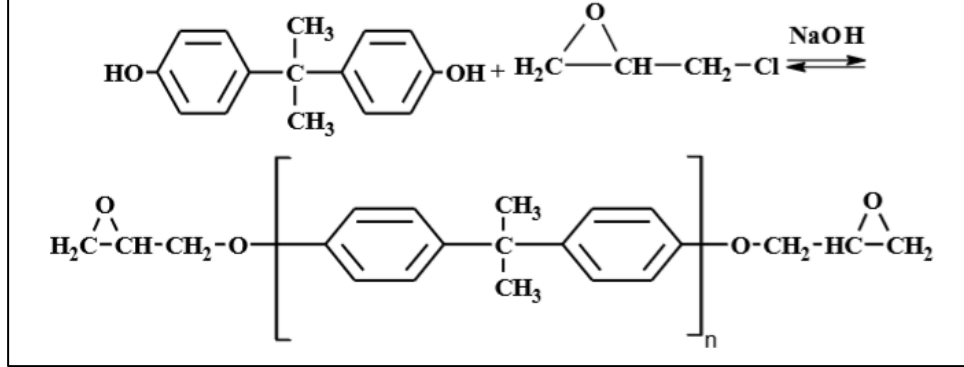


Şekil 2.6: R'nin diglisidil esteri.

Diglisidil eter yapıları içeren epoksi reçinelerinde bulunan -OH fonksiyonlu bileşiğin türü ve polimerleşme derecesi, ortaya çıkan reçinenin yapısal özelliklerini belirler. Genel anlamda epoksi reçine sentezinde kullanılan -OH fonksiyonlu bileşik türlerine göre oluşan epoksi reçineler aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir [15]:

- Difenilol propan (Bisfenol A (BPA)) esaslı epoksi reçineler,
- Difenilol metan (Bisfenol F (BPF)) esaslı epoksi reçineler,
- Novalak reçinesi esaslı epoksi reçineler,
- Alifatik poliol esaslı epoksi reçineler,
- Sikloalifalik epoksi reçineler,
- Epoksi fonksiyonlu akrilik reçineler

Bu çalışmaya da konu olan epoksilerde kullanılan difenilol propan (Bisfenol A (BPA)) esaslı epoksi reçineler difenilol propanın klorometil okziran ile yaptığı tepkime sonucunda oluşturulur ve mekanizma şekil 2.7'deki gibidir [17]:



Şekil 2.7: Bisfenol A esaslı epoksi reçinelerin genel oluşum mekanizması.

Oluşan reçinede n sayısı küçüldükçe örneğin 1 gibi bir değer aldığında oda sıcaklığında sıvı olan reçineler elde edilir. Bu değer büyüdükçe daha büyük molekülü katı reçineler elde edilir.

Epoksi reçineler doğrusal yapıli oligomer bileşiklerdir. Bu nedenle fiziksel ve mekanik özellikleri çok düşüktür. Epoksi reçinelerinin fiziksel ve mekanik dayanımlarını artırmak için kimyasal özelliklerinin değiştirilerek çok sayıda çapraz bağ içeren yapılara dönüştürülmesi gereklidir. Bu da sertleştiriciler denilen kimyasallarla olur. Sertleştiriciler kullanılarak setleştirilen epoksi reçineleri daha yüksek fiziki ve mekanik özelliklerinin yanı sıra yüksek kimyasal direnç ve elektrik yalıtkanlığı da kazanmış olur. Epoksi reçinelerin sertleştirilmesi, çok fonksiyonlu maddelerle; poliamidler, poliamid reçinesi, izosiyanatlar, fenol formaldehit ve aminoformaldehit reçineleri, organik asitlerin anhidridleri ile polikondenzasyonu ya da lewis asitleri etkisiyle iyon polimerizasyonu ile gerçekleştirilir.

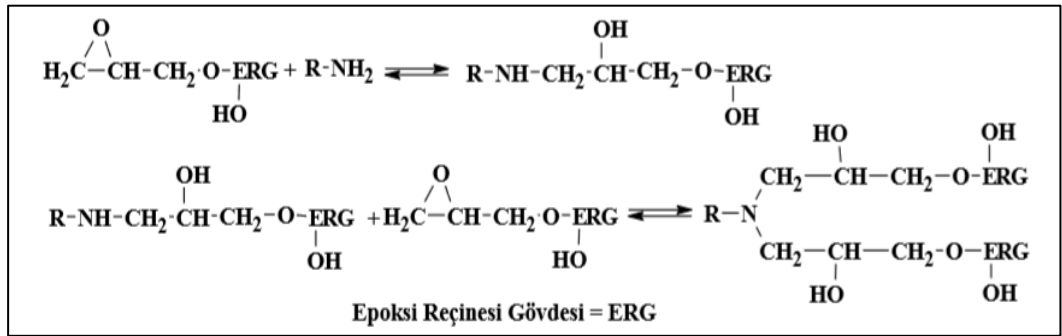
Sertleştirilmiş epoksi reçinesinin yapısını belirleyen, mekanik ve fiziksel özelliklerini etkileyen faktörler;

- Sertleşme mekanizması; sertleştiricinin fonksiyonel gruplarının türü,
- Reçine ve sertleştiricilerdeki fonksiyonel grupların sayısı; çapraz bağlanma yoğunluğu,
- Reçine ve sertleştiricilerdeki fonksiyonel grupların arasındaki bağların moleküler yapısı,

- Reçine ve sertleştiricilerin molar oranı; çapraz bağlanma yoğunluğu (crosslink),
- Sertleşme derecesi veya sertleşme koşullarıdır.

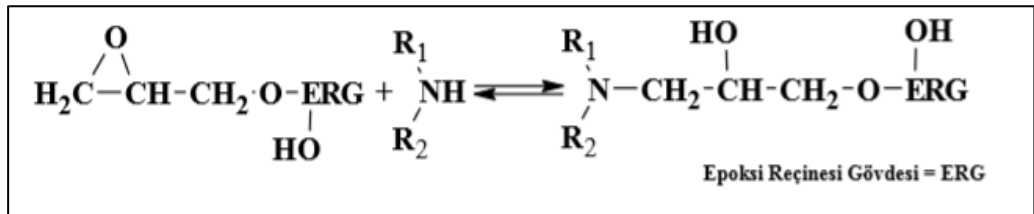
Genellikle iki bileşenli epoksi-poliamin ve epoksi-poliamid sistemlerin film oluşturma proseslerinde meydana gelen epoksi reçinesi üzerindeki okziran gruplarının birincil ve ikincil aminlerle oda sıcaklığında yürüyen tepkimeleri [17] Şekil 2.8 ve Şekil 2.9'daki gibi gösterilebilir:

Birincil aminlerde;



Şekil 2.8: Okziran grubun birincil amin tepkimesi.

İkincil aminlerde;



Şekil 2.9: Okziran grubun ikincil amin tepkimesi.

Yukarıda ana kimyasal tepkime basamakları gösterilen epoksiler, metal kaplamalar, otomotiv astarları, baskılı devre kartları, yapıştırıcılar ve havacılık kompozitleri gibi çeşitli uygulamalara sahip çok yönlü polimer sınıflarından biridir. Çoğu kürlenmiş epoksi reçinesi, mükemmel mekanik mukavemet ve tokluk ile amorf termoset özelliği göstermenin yanı sıra; olağanüstü kimyasal, nem ve korozyon direnci; iyi termal, yapışkanlık ve elektriksel özellikler, uçucu madde emisyonu olmaması, kürlenmede düşük büzülme ve boyutsal kararlılık olmak üzere genelde başka herhangi bir plastik malzemede bulunmayan özelliklerin benzersiz

kombinasyonlarını sağlar. Bu üstün performans özellikleri ile yukarıda anlatılan formülasyonun çok yönlülüğü ve makul maliyetler birleştiğinde, çok sayıda yapıştırma, yapısal ve koruyucu kaplama uygulamaları için epoksi reçineler en çok tercih edilen malzemeler olarak kabul edilmiştir.

Ticari epoksi reçineleri alifatik, sikloalifatik veya aromatik iskelet içerir ve birkaç yüz ila on binlerce farklı molekül ağırlığında mevcuttur. En yaygın kullanılan epoksiler daha önce de belirtildiği gibi, bisfenol A'nın glisidil eter türevleridir (reçine satış hacminin % 75'i). Oldukça yüklü epoksi halkaların çeşitli koşullar ve sıcaklıklar altında çok çeşitli kütleme ajanları ile reaksiyona girme kabiliyetleri epoksilere fazlaca çok yönlülük kazandırır. Epoksi reçinelerin başlıca endüstriyel kullanımı ısıyla sertleşen termoset uygulamalarıdır. Sertleştirici ajanlarla tepkime sonucunda çözünmez ve sağlam yapıda termoset polimerler verir. İşlemeyi kolaylaştırmak ve iyileştirilmiş reçine özelliklerini değiştirmek için, bileşimlere başka bileşenler de dâhil edilebilir: dolgular, çözücüler, seyrelticiler, plastikleştiriciler, katalizörler, hızlandırıcılar, sertleştiriciler ve renklendiriciler..vs. [14].

Epoksi reçineler ilk olarak 1940'ların sonlarında ticari olarak satılmaya başlanmıştır ve şu anda bir dizi sanayi sektöründe kullanılmaktadır. Bunlar genellikle performans özelliklerinin gerekli olduğu ve hatırı sayılır yüksek fiyatlarının haklı olduğu zorlu uygulamalardır. Bununla birlikte, aromatik epoksilerin, zayıf ultraviyole (UV) ışık direncinden dolayı dış uygulamalardaki kullanımlarını sınırlandırmaktadır. Yüksek derecede çapraz bağlı epoksi termosetler bazen kırılmalardan muzdariptir ve genellikle daha iyi darbe direnci için sertleştiricilerle modifiye edilir [14].

Epoksi reçinelerin en yaygın kullanımı koruyucu kaplamalardır (>% 50), geri kalanı baskılı devre kartı (PCB) laminatları, yarı iletken enkapsülantlar ve kompozitler gibi yapısal uygulamalardadır. Koruyucu kaplamalar genel olarak kalıplama, döküm, zemin uygulamaları ve yapıştırıcılardır. Yeni, gelişen uygulamalar ise elektronik endüstrisi için litografik mürekkepleri ve fotorezistleri (ışık direnci) içerir [14].

### **2.1.6. Epoksi Polimerlerin Isıl Etkiler Karşısında Gösterdikleri Değişiklikler**

Polimerik malzemeler ısıl etkilerle karşılaştıklarında hem fiziksel hem de kimyasal değişikliklere uğrama eğilimindedirler. Böyle değişiklikler kolaylıkla malzemenin kullanışlı bulunan özelliklerinde istenmeyen değişikliklere sebep olur.

Belirli miktarda ısı uygulandığında, büyük moleküllü bu katılardan yakıt buharları yükselmeye başlar. Buhar halindeki bu türler havadaki oksijenle karşılaştıklarında hemen yanma reaksiyonu verirler. Böyle bir reaksiyonun, onu başlatan ısı etki ortadan kalktıktan sonra da devam etmesi, malzeme üzerinde gerçekleşen yanmadan yanıcı buharları oluşturabilecek oranda ısı akısı sağlanmasına bağlıdır. Böyle bir durumda malzeme tükenene ya da dış bir etkiyle söndürülene kadar parçalanıp uçucu hale gelip yanmaya devam eder. Yanma devam ederken ortaya çıkan erime, kömürleşme gibi değişiklikler de reaksiyon yapısı ve kinetiği üzerinde farklı etkiler yaratır, bazı durumlarda reaksiyonu durdurabilir, bazı durumlarda ise hızlandırabilir [18, 19].

Polimerlerin gazlaşması genellikle kolayca buharlaşan yanıcı sıvılara göre daha karmaşık bir süreçtir. Sıvılarda, sıvı yüzeyindeki buhar basıncını denge durumuna getirecek oranda buharlaşma olur. Dolayısıyla, yüzeyinde buharı yanan bir yanıcı sıvı buhar halindeki moleküller sürekli yanarak tükendiği için hızla buharlaşır. Epoksi polimerlerde ise durum çok farklıdır. Buharlaşmaya hiç elverişli olmayan bu katıların oldukça büyük molekülleri önce molekül içi ve moleküller arası bağların kopması ile küçük parçalara ayrılır. Açığa çıkan bu küçük parçalar da ortamdaki ısı ile buharlaşarak yapıdan ayrılma eğilimi gösterir. Parçaların hepsi aynı boyda ve yapıda olmaz, bu sebepten farklı buhar – yoğun faz dengeleri kurulur. En küçük moleküller hızla buhar fazına geçerken, daha ağır parçalar yoğun fazda kalır ve tekrar parçalanabilir. Genellikle bu mekanizma ortada hiç katı kalıntı kalmayana kadar sürer ancak ana malzemenin tamamen gazlaşmayıp geride kararlı katı kalıntılar kalmasına daha sık rastlanır. Bu kalıntılar karbon yapılı, anorganik veya ikisinin karışımı olabilir [18, 19].

Ahşap benzeri kömürleşmeye yatkın malzemelerde yanma sonucu karbon kütlenin önemli bir kısmı gözenekli kömür halinde geride kalır. Yanmayı destekleyen şartlar devam ettiği takdirde bu malzemelerin parçalanması ile oluşan hafif parçaların uçucu hale gelerek reaksiyona katılmadan önce yüzeyi kaplayan katı yapı içinden geçmesi gerekir ve bu sırada hem ikincil reaksiyonlara girerler hem de hareketleri sonucu kömür yapısını etkileyebilirler. Uygun şartlarda olduğu takdirde kömürsü katmanlar şişme davranışı göstererek yalıtkan boşluklu yapılar oluşturabilir ve geride kalan malzemenin yanma reaksiyonunu desteklemesini yavaşlatabilir. Elbette bu karbonlu kalıntılar da yüksek sıcaklıklarda yanma reaksiyonuna katkıda bulunurlar. Anorganik kalıntılar ise yanmayı engelleme konusunda daha kabiliyetlidir. Bunlar

cam benzeri gözeneksiz yapılar oluşturarak uçucu türlerin yüzeye çıkmasını tamamen engelleyebilir [18, 20].

Daha önce ifade edildiği gibi termoset olan epoksi reçineler form kazandıktan sonra eritilmeleri mümkün değildir. Bu malzemeler böyle fiziksel bir değişikliğe uğramadan ısı parçalanma reaksiyonları geçirirler dolayısıyla da bir erime noktasından bahsedilemez. Dolayısıyla camsı geçiş görülmez malzeme ısı parçalanmaya uğrayana kadar fiziksel faz değişikliğine uğramaz, yani hiçbir zaman akışkan hale gelmez.

### **2.1.7. Epoksilerde Isı Etkisiyle Kimyasal Parçalanma Reaksiyonları**

Polimerlerin ısı parçalanması, çevresel etkilere bağlı olarak, doğrudan ısı etkilerle kimyasal bağların ayrılması veya oksidatif süreçlerle gerçekleşir. Pratikte, kontrollü deney şartları dışında, hemen her zaman bu iki tip reaksiyon bir arada olur. Çoğunlukla kimyasal bağlar ısı ile parçalanırken, havadaki oksijen (veya başka bir yükseltgen) olayı hızlandırıcı etki yapar.

Polimerlerin ısı etkilerle kimyasal parçalanma mekanizmaları kopan bağların yerine göre kendi içinde ikiye ayrılan iki ana grupta incelemek mümkündür.

- Ana zincirde meydana gelen reaksiyonlar
- Zincir bölünmesi
- Çapraz bağların oluşması
- Yan zincirlerde ve bağlı gruplarda meydana gelen reaksiyonlar
- Yan zincir eliminasyonu
- Yan zincirlerde halkalı türlerin oluşumu

Fazla dallanma ve fonksiyonel grup içermeyen basit yapılı polimerlerde en fazla meydana gelen reaksiyonlar ana zincirdeki bağların kopması sonucu hafif fraksiyonların oluşmasını içerir. Bu bölünmeler zincir sonlarında veya zincir üzerinde rastgele pozisyonlarda oluşur. Zincir sonlarında meydana gelen reaksiyonlar sonucu monomerler ortaya çıkarken, zincir ortasındaki reaksiyonlar monomerlerin, 10 ya da daha az karbon atomlu parçalar olan oligomerlerin ve farklı kimyasal türlerin açığa çıkmasına sebep olur. Ana zincirde meydana gelen diğer reaksiyon tipi çapraz bağların

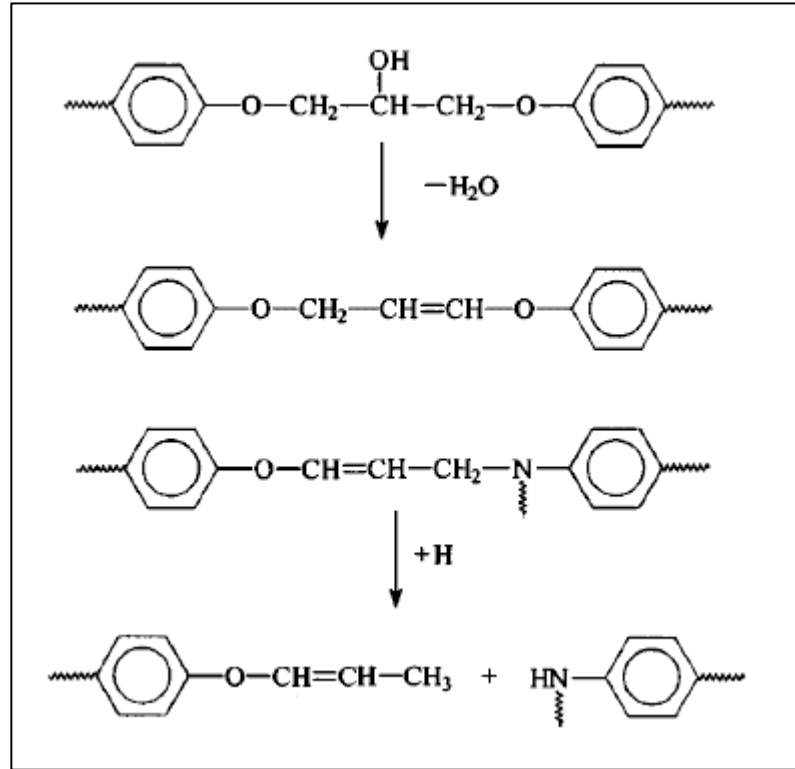
kurulmasıdır. Bu genellikle ana zincirin kırılan fraksiyonlarına bağlı grupların fonksiyonel uçlarının doğru geometride karşı karşıya gelmesiyle yan yana meydana gelmiş parçaların birbirine kaynaşması şeklinde açıklanabilir. Ortaya çıkan yapıların molekül ağırlıkları fazla olduğundan uçucu hale gelmeleri daha zordur. Bu mekanizma kömür oluşumunda pay sahibidir [18].

Yan zincirlerin ve bağlı grupların katıldığı reaksiyonlar eliminasyon reaksiyonlarıdır. Bu reaksiyonlarda yan zincirleri ve ana zincire bağlı olan ancak onun parçası olmayan grupları ana zincire bağlayan bağlar kopar. Sonuçta meydana gelen parçalar da birbirleriyle reaksiyon verebilirler. Ortaya çıkan türler genellikle uçucu hale gelebilecek kadar hafiftir. Bu gruba dâhil olan diğer reaksiyon türü iki bitişik yan grubun birbiriyle etkileşerek iki uçtan birbirine bağlanması sonucu halkalı yapıların oluşmasını içerir. Yan grupların eliminasyonu sonucunda ortada kalan katı zincirlerin kütlece karbon oranı başlangıç polimerine göre bir hayli yüksek olabildiğinden bu mekanizmalar kömür oluşumundan büyük oranda sorumludur [18].

Yukarıda açıklanan mekanizmalar sonucunda epoksi her zaman ısı parçalanma sonucu geride karbon oranı yüksek, grafit benzeri kalıntılar bırakır. Ortaya çıkan bu kömürsü kalıntılar ancak daha yüksek sıcaklıklarda gazlaşır veya oksidatif reaksiyonlara katılabilir. Oluştuktan sonra kalıntıların yoğunluk, süreklilik, kopma mukavemeti ve yükseltgenme direnci gibi karakteristik özellikleri sıklıkla malzemenin ısı parçalanma reaksiyonunun nasıl ilerleyeceğini belirleyen baskın etkenler haline gelir [21]. Malzemenin camsı geçiş yaşanmaması ve direk kimyasal parçalanmaya geçmesinin kuşkusuz yanma rejimi üzerine etkisi vardır. Bu yanma rejimi üzerinde de epoksinin oluşumunda içine karıştırılan katkı maddelerinin rolü büyüktür.

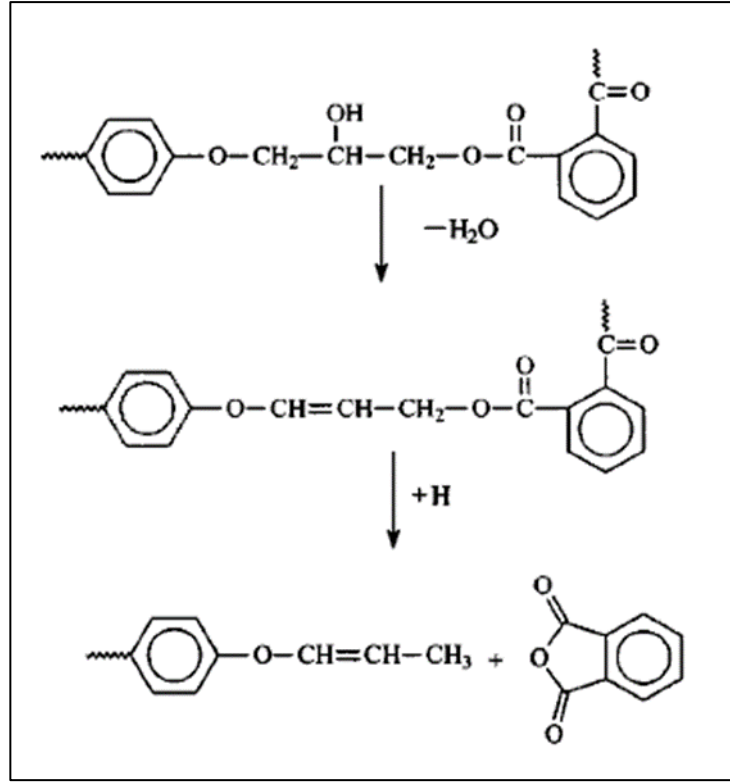
Sentetik karbon-oksijen zincir bağı ihtiva eden kürlenmiş epoksi sistemlerde benzen halkası varlığı ve yoğun yapı yığını içindeki kapalı blok ısıya maruz kaldığında bozunmada yavaşlatıcı etki göstermektedir. Genellikle reçineler ısıya veya alev maruz kaldığında ısı bozunma 300 °C derecelerde metilen-benzen halkasının parçalanmasıyla başlamaktadır. Derece 350 °C'ye çıktığında C3 bileşikler çokça bulunmaktadır. Isıtma işlemi devam ettiği ve sıcaklık 450 °C seviyelerine çıktığında karbonizasyon/kömürleşme, karbon oksitler ve su oluşur [22]. 500 °C derece seviyelerinde ise yoğunlaştırılabilir aromatik ürünler oluşabilir. Sıcaklık 800 °C derecelere ulaştığında ise artık halka yapılar kırılır, takiben karbondioksit ve metan gazları oluşur.

Epoksi reçinelerin parçalanma mekanizmaları çok kompleks ve çeşitlidir. Isıl kararlılıkları ve yanma rejimleri genellikle kürleyici malzeme ve çapraz bağ yoğunluğuyla ilgilidir. Genellikle herhangi bir epoksi sistemi ısı kaynağıyla karşılaştığında ısıl bozunmaya ikincil alkolün dehidrasyonu ile başlar ve şekil 2.10'da görüldüğü gibi vinilin eterler oluşturarak devam eder [23].



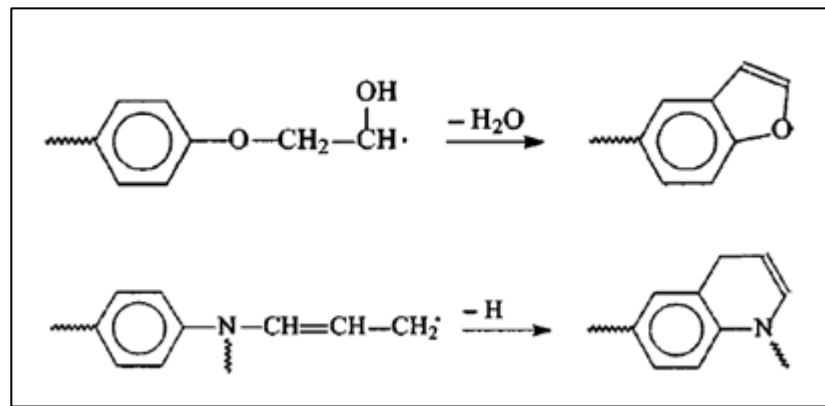
Şekil 2.10: Epoksi ısıl bozunmasında ikincil alkolün dehidrasyonu.

Allilik eterdeki C-O bağı normal pozisyonundaki C-O bağına ısıl olarak daha az kararsızdır ve genellikle zincir kopması buradan oluşur. Bu çalışmada kopolimer olarak bulunan aminler ile oluşan allilik C-N bağları ısıl olarak C-O bağlarından daha zayıftır ve C-N bağlarında şekil 2.10'da gösterilen parçalanmalar meydana gelmesi beklenir ancak aminler epoksi sisteminde miktar olarak çok küçük olduğu için genellikle zincir fragmanlarının bir parçası olarak uçarlar veya katı tortuda kalarak kömürleşmeye maruz kalırlar.



Şekil 2.11: Epoksi ısıl bozunmasında ardıl reaksiyonlar.

Ana zincir kırılmasına ek olarak birçok ikincil parçalanmalar meydana gelebilir ve ısıl bozunma sonucu küçük alt ürünler oluşabilir. Örneğin şekil 2.12’de gösterildiği gibi alifatik zincir halka oluşturması sırasında uçlarının ayrılmak yerine bitmesi kömürleşmeye sebep olur ve bir anlamda yangın geciktiriciliğe katkı sağlar [23].



Şekil 2.12: Alifatik halka oluşumları.

## **2.1.8. Epoksi Reçinelerde Katkı Maddeleri**

İşlem görmemiş epoksi reçinelerin yüksek viskozite, özel kullanım amaçlarında esnememe ve yüksek maliyet gibi üretici ve tüketici aleyhinde bir durum söz konusudur. Kürlenmiş veya kürlenmemiş halleri göz önünde bulundurulduğunda bazı spesifik amaçlı kullanımlar için reçine ve sertleştirici malzemelere ek olarak çok çeşitli katkı malzemelerinin reaksiyona eklenmesi gereği doğmuştur. Bu katkı malzemeleri ıslatıcı, seyreltici, dolgu, esnekleştirici ve renklendirici amaçlı kullanılmaktadır [14].

### **2.1.8.1. Seyreltici Malzemeler**

Epoksi karışımlarında viskozite önemli bir etken olup malzemeyle çalışmayı kolaylaştırmak ve diğer tüm katkı malzemeleriyle bütünleşmiş bir ürün hazırlamak amacıyla yüksek olan viskoziteyi düşürmek için kullanılan katkılara seyreltici (inceltici) malzemeler adı verilir. Tepki veren ve tepki vermeyen olarak iki ana türde kullanılan seyrelticilerin viskoziteye etkileri dışında başka bir çok spesifik özelliğe etkileri vardır. Islatıcı malzemenin etkisinin artırılması ve reçinenin lif takviyeli güçlendirmede daha iyi dâhil olmasına katkı sağlaması gibi iyi özelliklerinin yanı sıra göz ardı edilemeyecek derecede zehirli (toksik) bir etkisi de vardır. Öyle ki, bazı durumlarda reçine ve sertleştiriciden daha ön plana geçen bir etki söz konusudur. Bu sebeple kullanılan seyrelticinin miktarı ve hangi özelliği ne derecede etkilediği önemlidir.

Bu çalışmada seyreltici malzeme cinsi ve miktarı sabit tutularak numune hazırlandığı ve deney tabii tutulduğu için daha detaylı incelenmemiştir.

### **2.1.8.2. Dolgu Malzemeleri**

Epoksi formüllerinde, reçine ve sertleştiriciye artı olarak en yaygın kullanılan katkı malzemesi büyük olasılıkla dolgu malzemeleridir. Bir epoksinin bir veya birkaç özelliğini değiştirmek için yüzlerce farklı tip dolgu malzemesi kullanma seçeneği bulunabilir. Yalnızca ürün maliyetini azaltmakla kalmayıp, bir yandan reçinenin seyreltilmesinde faydalanılırken diğer yandan da kürlenme esnasındaki büzülme

etkisini azaltır. Isı çıkış miktarını ve genleşme katsayısını düşürürken ısı iletkenliği arttırıcı etkiler sağlamaktadır.

İç ana çekirdek malzemede genellikle kum gibi dolgular kullanılırken yüzeye yaklaştıkça metal tozları ve metal oksit dolguların kullanımı yaygınlaşmaktadır [21]. Dolgu malzemelerin kullanımı birçok açıdan avantajlı gibi görünse de formülasyonu etkilemesi muhtemel olan bazı özellikleri (örneğin viskozite artışı ve yüksek yoğunluk) kötüleştirilmesi açısından dezavantaja yol açabilecek durumlar oluşturabilir. Isı çıkışı, büzülme, genleşme katsayısı, formülasyon maliyeti ile su emilimini azaltırken tokluk, ısı iletkenlik katsayısı ile aşınma direncini artırma özellikleri avantaj sayılabilecekken; ağırlık, ağırlığa bağlı viskozite, dielektrik katsayısı ile ürünün işleme zorluklarının artışı dezavantajlı durumlar olarak dikkate alınmalıdır [25].

### **2.1.8.3. Esnekleştirici Malzemeler**

Epoksiyi esnekleştirmek için (genellikle bu işlem sonucunda tüm malzemenin tokluğu artar) plastikleştirici ve esnekleştirici katkı malzemeleri eklenebilmektedir [21]. Bu işlemde plastikleştirici ile esnekleştirici olarak ayrı anılmasının sebebi plastikleştirici malzemenin için tepkimeye girmeden inert bir şekilde hareket ederken esnekleştirici malzemenin kurlenme sırasında epoksi sistemiyle tepkimeye girmesidir. Polimerik esnekleştiricilere, özellikle dimer asit oluşturan düşük moleküler ağırlıklı poliamidlere, düşük moleküler ağırlıklı polisülfidler, poliaminler ve poliglikol diepoksitlerden daha fazla ilgi gösterilmiştir. Normal miktarda sertleştiriciye ek olarak kullanılan esnekleştiricilerle çok daha esnek, bükülebilen ürünler elde edilebilir.

### **2.1.8.4. Renklendirici Malzemeler**

Çevrede görülen her renkte olduğu gibi epoksilerde de renklendirici olarak pigmentler kullanılmaktadır. Bu çalışmanın da konusu olan epoksilerdeki renk farklılığı değişik pigmentlerin kullanımı ile elde edilir. Bu aşamada pigmentleri ve renk verdiği malzemeler ile olan etkileşimini iyi tanımak gerekmektedir.

Pigmentler asıl olarak renk değişikliği için kullanılsa da opaklık, sertlik, mekanik dayanım ve metal korozyonuna karşı koruyucu etkileri de olan doğal veya

sentetik katı parçacıklardır. İstenilen sonuçları elde edebilmek için pigmentlerin belirli özellikleri taşıması gerekir. Organik ve inorganik olarak da ikiye ayrılan pigmentlerden organik olanlar daha çok dekoratif amaçlı kullanılırken inorganik olanlar ile daha koruyucu ve geliştirici özellikler elde edilebilmektedir [26].

Kullanım esnasında pigmentler çözünmeden malzeme içinde dağılmış halde bulunur. Boyaların bu durumdan farkı ise çözünebilme ve çözelti halinde bulunabilme durumudur. Boya ve renklendirme endüstrisinde kullanılan pigmentlerin doğal, yapay, organik ve inorganik olma özelliklerinin yanı sıra suda veya yağda çözünme, ışık veya doğal hava olaylarından etkilenme ile örtücülük olarak adlandırılan sürüldüğü altlığın üstünün tamamen sürülen malzeme ile kaplayabilme özellikleri de önem arz etmektedir. Ayrıca pigment parçacıklarının boyut ve şekli de kullanım esnasında topaklanma veya bağlayıcı ile bütünlük sağlaması açısından dikkate alınması gereken etkenlerdir. Pigmentlerin çoğu kristal yapıdadır ve kristal formu genellikle pigmentin kullanım özelliklerini etkiler. Parçacık boyutu aynı zamanda bitmiş parlaklığı, depolama sırasında pigmentin matris içinde bütünlüğünü ve bağlayıcı tarafından ıslanmasını da etkiler. Renk, renk örtücülüğü, renk haslığı ve opaklık gibi diğer faktörler pigmentin doğal özellikleridir. Pigment hacmini de etkileyen bir başka önemli faktör olan yoğunluk, sadece çökelme / topaklanma açısından değil aynı zamanda belirli bir ağırlık hesabı için de dikkate alınmalıdır [26].

Uygun ve kalıcı bir görünüm sağlamak için pigmentlerin bağlayıcı içinde homojen bir şekilde dağılması gerekir. Süspansiyonda bütünleşik kalmaları veya çökme meydana gelirse dağılmalarının kolay olmaları gerekir. Pasta karıştırıldığında, pigmentler mekanik olarak bir öğütücüye dâhil edilir. Pigment öğütme işlemine dayanabilmelidir [26].

Çok çeşitli renk ve renk tonları sağlamak için çok çeşitli renklendirme ajanları kullanılabilir. Kullanılan pigmentlerin sayısı ve her birinin miktarı, renk, örtücülük, film oluşturma ve birçok diğer özelliği ile ilgilidir. Bazı yaygın kullanılan pigmentler ve özellikleri aşağıdaki bölümde verilmiştir [26].

### 2.1.8.4.1. Beyaz Pigmentler

Genellikle tüm boya formüllerinde, renklerin açıklık-koyuluk ayarını yapmak için bazı beyaz pigmentler kullanılır. Yaygın beyaz pigmentlerin bazıları aşağıdaki şekilde listelenmiştir.

**Titanyum dioksit (TiO<sub>2</sub>):** Hem koruyucu hem dekoratif boyalarda sabit ve örtücülük özellikleri sayesinde dünya genelinde en yaygın kullanılan beyaz pigmenttir. Rutil ve anastaz olarak adlandırılan iki kristal yapıda bulunmaktadır ki rutil form daha kompakt ve daha yüksek bir özgül ağırlığa, daha büyük kırılma indisine, arttırılmış stabiliteye ve arttırılmış dayanıklılığa sahiptir [26]. Beyaz renk kullanımında örneğin magnezyum oksit daha beyaz olmasına rağmen ışığı kırma kabiliyetinin az olmasından dolayı örtücülüğü iyi değildir, bu sebeple de titanyum dioksit beyaz renklendirmede daha çok tercih edilir [26]. Bu çalışmada da titanyum dioksit pigmenti kullanılmıştır.

**Çinko oksit (ZnO):** Yüksek seviyelerde (ağırlıkça yaklaşık % 30) eğer varsa küf oluşumunu inhibe edecek sentetik bazlı bir pigment. Çinko oksidin temel yapısı, çinko sabunları formülasyonu ile yüksek asit değerli boyalar ile etkileşime neden olur. Örtücülüğü çok yüksek olmayan ve dış etkenlere karşı dayanımı düşük bir pigmenttir [26].

**Antimon oksit:** Klor bileşikleri barındıran bağlayıcılarla birlikte alev geciktirici özellik gösteren sentetik, aktif olmayan bir pigmenttir. Aleve maruz kaldığında antimon klorür gazı açığa çıkar ve havadan daha ağır olduğu için yanan cisim üzerine çökerek yanmaya karşı yalıtım sağlar. Kullanıldığında opaklık sağlar [26].

**Beyaz Kurşun:** Üstübeç olarak da adlandırılan bu pigment yüzyıllardır temiz beyaz bir renk sağladığı için kullanılmış ancak son dönemde yüksek zehirliliğe sebep olduğundan yasaklanmıştır. Asıl yapısı kurşun hidrokarbonattır.

**Kalsiyum Karbonat:** İspanya beyazı olarak da adlandırılan bu pigment doğal kireçtaşından ezilip çöktürülerek üretilir. Ancak sararmaya sebep olduğundan çok tercih edilmemektedir. Bu pigment bezir yağı ile karıştırıldığında cam macunu, balmumu ile karıştırıldığında terzi tebeşiri elde edilir [27].

**Kalsiyum Sülfat:** Öğütülmüş doğal alçı taşından ya da çöktürülmüş sülfattan üretilir. Pigment dolgu malzemesi ya da kâğıt hamuru üretiminde kullanılır [27].

#### 2.1.8.4.2. Sarı Pigmentler

Renk tayfının sarı-mavi eksenini ayarlamak için sarı pigmentler kullanılır. Yaygın sarı pigmentlerin bazıları aşağıdaki şekilde listelenmiştir.

Sarı boyalar: Azo boyalar, portakal renginden yeşil tondaki sarılara kadar değişir. Boya beyaz pigmentlerle azaltılmadıkça, tam gölgede iyi ışık stabilitesine sahiptirler. İyi opaklık sağlarlar ve toksik değildirler, dolayısıyla genellikle kurşun kromatlar yerine kullanılırlar. Sarı boyalar ketonlarda, esterlerde ve aromatik çözücülerde çözünür, ancak alifatik çözücülerde zayıf çözünürlüğe sahiptirler. Bu, onları alifatik hidrokarbon içeren hava kurumalı kaplamalarda veya emülsiyon sistemlerinde kullanım için uygun kılar [27].

Krom Sarı: Kurşun kromattan elde edilmesiyle birlikte açık olanları kurşun sülfat içereni turuncuya dönük olanları  $PbCrO_4 \cdot Pb(OH)_2$  genel formülü ile gösterilen, baziklik arttıkça kırmızıya dönüşen bazik tuzlardan oluşmaları da bulunmaktadır. Örtücülüğü ve ışık dayanımı yüksek olmasına rağmen zehirlilik seviyesi çok yüksek olduğundan kullanımları yasaklanmıştır [26]. Ultramarin sarısı da denilen baryum kromat orta derecede örtücülüğe sahip oldukça zehirli bir pigmenttir. Yağlı ve sulu boya üretiminde kullanılır [26].

Çinko Sarı:  $ZnCrO_4 \cdot ZnO$  formülünden  $ZnCrO_4 \cdot 2ZnO$  formülüne değişen üç ayrı formda bulunurlar. Örtücülükleri iyi olmayıp krom sarılar kadar sabit değildirler [26].

Demir Sarı: Bu pigment hidratlı demir III oksitli kilden elde edilir. Doğal veya sentetik tüm demir oksitler alkali ve organik asitlere dayanıklı ancak mineral asitlerine karşı zayıftır. UV radyasyonunu emer ve dış cephe boyalarında koruyucu bir etkiye sahiptir [27].

Kadmiyum Sarı: Kadmiyum sülfürden elde edilen bu pigment çok sabit ve göz alıcıdır. Yüksek örtücülüğe sahiptir, kükürtlü hidrojenle etkilenmez ve zararsızdır [27].

Antimon Sarı: Napoli sarısı olarak bilinen fazla kurşun oksitli en yaygın rengi kurşun antimoniat ve kurşun oksiklorürden elde edilen bir karışımdır. İnce boya üretiminde kullanılır [26].

Arsenik Sülfür Sarı: Dericilik sektöründe kullanılan bu pigment yüksek zehirliliği nedeniyle fazla tercih edilmemektedir [27].

### 2.1.8.4.3. Yeşil Pigmentler

Yeşil pigmentler rengin mavi-sarı eksenini ayarlamak için kullanılır. Yaygın yeşil pigmentlerin bazıları aşağıdaki şekilde listelenmiştir.

**Ftalo Yeşil:** Doğal halinde tamamıyla organik olmayan tuz karışımı bir pigmenttir. Mavi-yeşil bir renk veren bu pigment çok iyi bir opaklık sağlamaktadır [27].

**Krom Yeşil:** Susuz veya hidratlı krom oksit ( $Cr_2O_3$ ) olan pigment, ısıya, ışığa, aside ve alkaliye çok dirençli olmasına rağmen düşük opaklık sağlamaktadır. Ekonomik ve sabit bir pigment olduğundan beton ve çimento sektöründe kullanımı vardır [26].

**Demir Yeşil:** Demir II oksit bileşikleriyle yeşil renkte olan topraktan elde edilen bu pigment sağlam ancak silik bir renk sağlamaktadır [27].

### 2.1.8.4.4. Mavi Pigmentler

Mavi pigmentler rengin mavi-sarı eksenini ayarlamak için kullanılır.

**Ftalosiyanın Mavi:** Kırmızımsı maviden sarımsı yeşile çok geniş bir renk portföyüne sahip olan bu pigment; çok iyi ışık haslığı ile birlikte yüksek renk tonu mukavemeti ve yüksek opaklık gösterir. Toksik değildir, sıcaklığa dayanıklıdır ve güçlü asitler dışındaki çoğu çözücü ve kimyasallara karşı dayanıklıdır. Bu pigmentler genellikle boya ve cilada kullanılır [26].

**Prusya Mavi:**  $[(FeCN_6)_3Fe_4.4H_2O]$  formülüne, yüksek boyama gücüne, ancak düşük opaklığa sahip, parlak mavi, sentetik bir pigmenttir. Hava ile temasta bulunduğu kararma eğilimindedir [26].

**Ultramarin Mavi:** Kompleks sentetik alüminosilikat pigment, yarı değerli taş lapislazuli doğal olarak oluşur. Pigmentin rengi, sodyum sülfür miktarına göre değişir. Renk tonu, üretiminde kullanılan silika miktarına bağlıdır. Pigment, kaba bir yapıya sahiptir ve sert bir şekilde çökmeye maruz kalır, fakat iyi ışık haslığı, ısı ve alkali direnci vardır. Aside maruz kalırsa bozunur [26].

**Kobalt Mavi:** Çok miktarda alüminle karışık kobalt alüminatlardan elde edilen pigment pahalı olduğu için genellikle ince boya üretiminde kullanılır. Sevres mavisi,

saksonya mavisi ve smalt mavisi gibi diğerk bazı kobaltlı maviler camlaşmış silikat ve boratlardan elde edilmiş olup seramik sektöründe kullanılır [27].

#### **2.1.8.4.5. Kırmızı Pigmentler**

Mavi pigmentler rengin kırmızı-yeşil eksenini ayarlamak için kullanılır.

Toluidin Kırmızı: Parlak ve temiz kırmızı renk vermesiyle karakterize azo boya, yüksek ışık haslığı ve opaklığa sahiptir ve zehirli değildir. Tek başına renk sabitliği iyiyken yaz pigmentlerle birlikte renk sabitliği azalır. Asit ve bazlara dayanıklıdır ve ortalama 170 derece sıcaklığa kısa süreliğine de olsa dayanır. Aromatik çözücülerde çok, alifatik çözücü ve alkollerde az çözünür, bu sebeple birçok sistemde kullanımı hassastır [26].

Arilamid Kırmızı: Turuncudan koyu kırmızıya değişen, beyaz pigmentlerle kullanılsa bile iyi ışık haslığına sahip zehirli olmayan azo boyardır. 150 dereceye kadar ısıtıldığında sabitliğini korur. Asit ve bazlara dayanıklı olmasıyla birlikte çözücülerde çok hafif çözünür. Genellikle dekoratif dış ortam uygulamalarında kullanılır [27].

Demir Oksit Kırmızı: Hematit cevherinden elde edilen doğal kırmızı oksitler ve sentetik kırmızı demir oksitler pigment olarak kullanılır. Demir oksit içeriğindeki safsızlık aracılığıyla turuncudan kahverengiye kadar değişen renklerde pigment eldesi sağlanır. Doğal oksitler kereste lekelerinde ve düşük maliyetli metal astarlarda kullanılır. Sentetik oksitler daha yumuşak bir dokuya ve daha yüksek saflığa sahiptir, daha parlak, daha temiz renkler ve daha fazla örtücülük sağlar. Doğal ve sentetik oksitler alkalilere ve organik asitlere karşı dayanıklıdır, ancak mineral asitlere ve yüksek sıcaklıklara tepki verebilir. UV radyasyonunu emer ve boya filmlerinin solmaya karşı direncini artırır [26].

Civa Sülfür Kırmızı: Antik zamanlarda Çin'de kullanılan güzel bir kırmızı ortaya çıkaran pigment olmasına rağmen kolayca kahverengine dönüşmesi, zehirlilik ve pahalılığı nedeniyle günümüzde çok kullanılmamaktadır [26].

Antimon Sülfür Kırmızı: Farklı oranlarda antimon oksit ile antimon tri sülfürün ( $Sb_2S_3$ ) karıştırılmasıyla elde edilen güzel kırmızı renk zehirli değildir ancak bazik çözeltilere dayanıksızdır. Elastomerlerin renklendirilmesinde kullanılır [26].

Kadmiyum Sülfür Kırmızı: Kadmiyum selenür ile kadmiyum sülfür karışımından elde edilen pigment ışığa dayanıklı olmadığından ince boya uygulamaları dışında kullanımı çok elverişli değildir [26].

#### **2.1.8.4.6. Siyah Pigmentler**

Genellikle tüm boya formüllerinde, renklerin açıklık-koyuluk ayarını yapmak için bazı siyah pigmentler kullanılır. Yaygın siyah pigmentlerin bazıları aşağıdaki şekilde listelenmiştir.

Karbon Siyah: Hidrokarbon minerallerinin, bitkilerin ve hayvan kemiklerinin yakılmasıyla (karbonizasyon) üretilir. Verimlilik % 15-20'dir [27]. Özellikleri karbonun kaynağına ve mevcut kirliliklere göre değişir. Karbon siyahları ışığa dayanıklıdır, asitlerde ve bazlarda çözünmez ve çözücülere karşı dirençlidir. Düşük ekleme seviyelerinde bile iyi opaklık sağlarlar.

Demir Oksit Siyah: Esas olarak dolgu maddeleri, astarlar ve astarlar için bir renklendirici olarak kullanılan düşük renklendirme gücüne sahip sentetik bir pigmenttir. Pigment ısı ile kırmızılaşır, ancak iyi kimyasal dirence sahiptir [26].

Doğal olarak veya sentetik yollardan pigment üretimi asırlar boyu gelişen teknoloji ile birlikte evrilmiş ve çok farklı pigment çeşidi oluşturulmuştur. Bu çeşitlerin tümünü bu çalışmada incelemek mümkün olmasa da ana renkler üzerinden gidilerek her bir çeşidin ne kadar çok ve özgün karakteristikleri etkileyebildiği görülmüştür.

Literatüre bakıldığında birçok farklı değişken epoksinin son ürün halini etkilediği ve incelemeye tabi tutulduğu anlaşılmıştır [26], [27]. Bu çalışmada ise daha önce incelenen diğer özelliklerden farklı olarak yanma davranışına ve yangın sınıflandırmasına pigment değişiminin ne derece etki ettiği yer verilmiştir. Genel bilgi olması açısından bir sonraki bölümde genel olarak polimerler ve epoksi malzemelerin yangın sınıflandırması ve yanma davranışları anlatılmıştır. Epoksi kaplamalar genel olarak yapı malzemesi sınıfında değerlendirildiğinden ürünün son kullanımdaki yangına tepkisi ve aleve karşı davranışı esas alınarak verilen bilgiler yürütülen çalışmaya daha bilinçli yaklaşıma zemin oluşturacaktır.

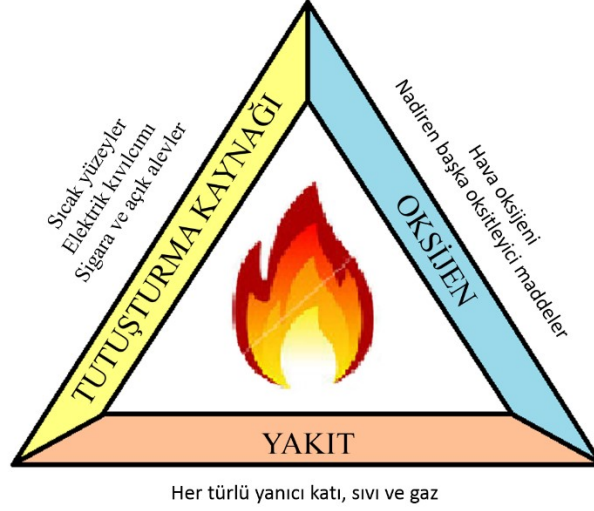
## 2.2. Yangın Olayının Dinamikleri

Yangın dinamiklerine giriş yaparken öncelikle yangın olayını tanımlamanın ve bu olayın klasik bir yanma reaksiyonundan farklarını ortaya koymanın faydası olacaktır. Yanma bir yakıt ile yükseltgen (oksitleyici) arasında meydana gelen redoks reaksiyonlarını ifade eder, genellikle ekzotermik bir olaydır. Kömürün tutuşturularak ısı elde edilmesi gibi canlıların besinlerinde depolanmış kimyasal enerjiyi açığa çıkararak kullanmak için faydalandıkları reaksiyonlar ve demirin paslanması gibi reaksiyonlar yanma reaksiyonlarıdır. Yangın da bir çeşit yanmadır ancak sindirim, paslanma gibi görece yavaş veya kontrollü yanma reaksiyonlarını kapsamaz. Daha kaba bir tanım olsa da, temelde yangın, bir çevrede, yakıt değeri olan malzemelerin ısı etkileriyle tutuşması sonucu, genellikle istenmeyen, hızlı oksidasyonu olarak tanımlanabilir ve ısı, ışık, duman ve katı kalıntılar açığa çıkarır.

### 2.2.1. Yangın Üçgeni ve Yangın Dörtüzlüsü

Yangın üçgeni, bir yangının başlaması ve başladıktan sonra yanmaya devam etmesi için gereken üç faktörün basit bir gösterimidir. İtfaiyeciler ve genel olarak yangın güvenliği ile ilgilenen uzmanlar tarafından bu faktörleri kolay akılda kalır şekilde açıklamak için kullanılır. (Şekil 2.8) Ayrıca yangını önleme ve yangınla başa çıkma önlemleri açısından da fikir vericidir. Üçgeni oluşturan etkenlerden biri olmadığında yangın oluşmaz, süregelen bir yangında da yakıt veya oksijen tedariki kesildiği ya da yakıt ile oksijenin bağlantısı koparıldığı takdirde yangın söner.

Üçgeni oluşturan etkenlerden ilki tutuşturma kaynağı, diğer bir deyişle yangın başlatıcıdır. Bir yangının oluşabilmesi için öncelikle yeterli miktarda aktivasyon enerjisine ihtiyaç vardır. Bu aktivasyon enerjisi, mum alevi, kibrit, sigara, sıcak yüzeyler, elektrik kaçakları gibi yangın kaynaklardan sağlanabilir. Bunların yanında gereken ısı beklenmedik kaynaklardan da gelebilir. Örneğin bazı güçlü formüllü lavabo açıcılar ambalajlarında açık olduğunda havadaki nem ve oksijenle karşılaştıklarında ciddi ısı açığa çıkaran reaksiyonlar verebilmekte ve ambalajlarını tutuşturabilme riski taşımaktadır.



Şekil 2.13: Yangın Üçgeni.

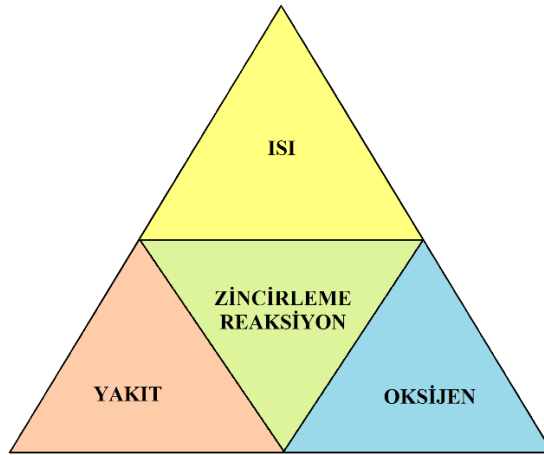
Sıradaki etken yakıttır. Seramikler gibi zaten son yükseltgenme basamaklarında bulunanlar hariç tüm malzemeler uygun şartlar altında yanma reaksiyonu verir. Ancak malzemeler için bu uygun şartlar farklılık gösterir. Yangın üçgenindeki yakıt sık kullanılan ve kömür, petrol gibi enerji kazanmak amacıyla tüketilen malzemeleri kapsayan anlamından biraz daha geniş bir anlama sahiptir. Yangın sürecinde karşılaşılabilecek sıcaklık, basınç ve oksijen derişimi şartlarında ekzotermik yanma reaksiyonu veren her türlü malzemeyi ifade etmektedir.

Yangında katı yakıtlar çoğunlukla karbon içerikli malzemelerdir. Odunsu bitkiler, genel olarak orman ürünleri, halılar, perdeler, mobilyalar, kauçuk ve plastik ürünler yaygın karşılaşılan örnekleridir. Bunların yanında metaller de çok tehlikeli yakıtlar olabilmektedir. Lityum potasyum gibi alkali metaller, magnezyum gibi alkali toprak metalleri ve titanyum, zirkonyum gibi 4. grup geçiş metalleri çok tehlikeli ve özel kontrol önlemleri olmaksızın durdurulması mümkün olmayan yangınlara sebep olabilmektedir. Bazı katıları oluşturan parçacıklar kısmen de olsa parçalanıp gazlaşmadan yangına fazla bir katkıları olmadığı için yangına katılmaları için dikkate değer bir ısı ile karşılaşmaları gerekir. Ancak tekstil ürünleri, polimer yapılı izolasyon levhaları gibi gözenekli katıların oksijenle temas eden yüzey alanları çok geniş olduğu için bunlar kolayca tutuşarak yangın çıkarabilir ve diğer katıların yanması için gerekli ıslıyı göz açıp kapayana dek sağlayabilirler.

Yangın üçgeninde ele alınan üçüncü etken oksitleyici maddedir. Bu etken kimya laboratuvarları, kimyasal madde fabrikaları, enerji santralleri, rafineriler gibi çok özel

yapılar dışında her zaman havadaki oksijendir. Havada ortalama %19,6 oranında elementel halde oksijen bulunmaktadır. Dolayısıyla yangın güvenliğinden bahsedebileceğimiz her ortamda oksitleyici mevcuttur. Ortamda bulunan oksijene ek olarak, örneğin, havalandırma sistemleri ortama sürekli fazladan oksijen sağlayabilen yapılardır. Oksijen tüplerinin iş gereği veya tıbbi amaçlarla kullanıldığı durumlar da yaygındır. Ayrıca gübre olarak kullanılan amonyum nitrat, böcek ilacı olarak kullanılan sodyum klorat, su arıtma amacıyla kullanılan hidrojen peroksit gibi malzemeler kendileri iyi yükseltgenler olduğu gibi, buldukları ortamda bozunmaları sonucu da açığa oksijen çıkar.

Yangın üçgenine, olayı daha iyi açıklamak için dördüncü bir bileşenin eklenmesi ile yangın dörtyüzlüsü elde edilir (Şekil 2.9). Bu bileşen zincirleme reaksiyondur. Zincirleme reaksiyon, yangın tarafından üretilen ısının yakıtta geri beslenmesi ile yanmayı sürdürecektir olan gazlaşma olaylarının devam ettirilmesini ifade eder [28].



Şekil 2.14: Yangın Dörtyüzlüsü.

### 2.2.2. Yangının Yayılması

Yangın başladıktan sonra alevlerin ve açığa çıkan sıcak gazların sahip olduğu ısı enerjisi çevreye üç farklı yolla yayılır: kondüksiyon, konveksiyon ve radyasyon.

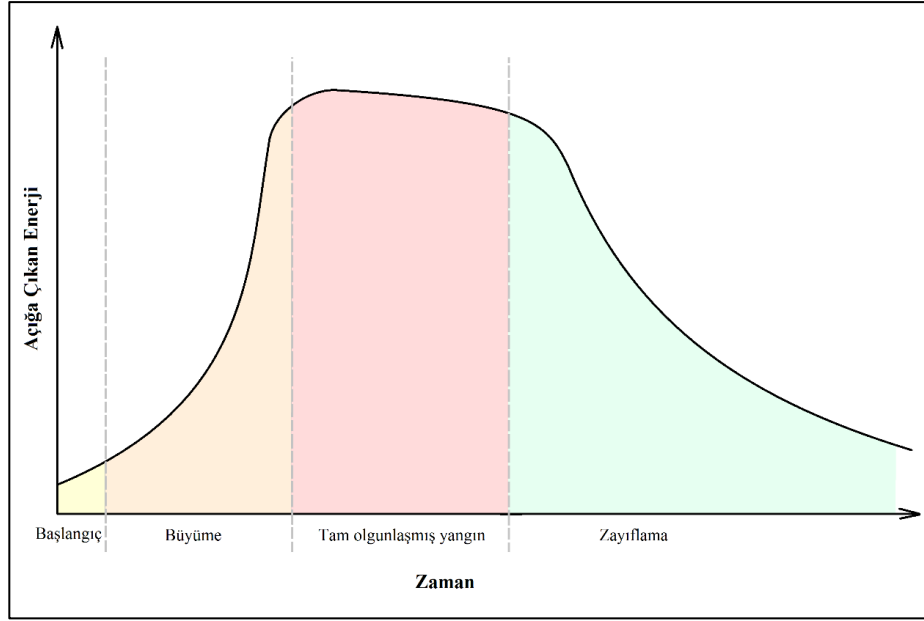
Kondüksiyon ısı enerjisinin maddeyi oluşturan parçacıkların çarpışmaları sonucu doğrudan temas yoluyla iletilmesidir. Bir ısı iletkenin kendi üzerinde ısının aktarılması da bu yolla gerçekleşir. Metal bir çöp kutusu içinde başlayan yangının açığa çıkardığı ısının kutunun zemini tarafından direk temas yoluyla döşemeye iletilmesi kondüksiyonel yayılmaya iyi bir örnektir.

Konveksiyon akışkanların hareketi yoluyla ısı transferini ifade etmek için kullanılır. Sıcak hava soğuk havaya göre daha az yoğundur ve soğuk havanın üstünde yüzme eğilimi gösterir. Bu nedenle bir ortamda ısınan hava yükselirken soğuyan hava alçalır. Yangının başladığı bölgede de alevler ve ısınan gazlar bir sütun halinde yükselirler. Açık alan yangınlarında böyle bir sütun ortamdaki havayla temas halinde soğuyana kadar yükselir, bu nedenle konveksiyonel yayılma ancak rüzgâr gibi dış etkenlerle etkili olur. Üstü kapalı bir alanda ise, sütun tavanla karşılaşarak engellenir ve sıcak gazlar tavan yüzeyinde yayılarak bir katman oluşturur. Duvarlarla karşılaşan bu katman zemine doğru büyümeye devam eder.

Radyasyon terimi elektromanyetik dalgalar yoluyla yayılan enerjiyi ifade etmek için kullanılır. Elektromanyetik dalgaların madde gibi bir taşıyıcıya ihtiyacı yoktur. Bir yangında, alevlerin ve ısınan maddelerin yaydığı radyasyon tüm yönlere yayılır ve bir cisme çarpıp yansıyana veya soğurularak enerjisini aktarana kadar hareketini sürdürür. Isıl radyasyon pencere camları tarafından yalnızca kısmen soğrulur ve bazı durumlarda camın bir tarafında çıkan yangın diğer tarafındaki nesnelere radyasyon yoluyla tutuşturabilir. Ayrıca yanan binalar radyasyon yolu ile çevredeki başka yapıların aşırı ısınarak yanmaya başlamalarına sebep olabilmektedir.

### **2.2.3. Yangının Evreleri**

Yangının 4 ana aşamada meydana geldiğini söylemek mümkündür. Bu aşamalar sırasıyla başlangıç, büyüme, tam olgunlaşmış yangın ve zayıflama şeklinde isimlendirilir. Şekil 2.10'da verilen grafik belirtilen aşamalarda sınırlı yakıtı bulunan, kapalı bir bölümdeki bir yangından ortama salınan ısının idealize bir gösterimini yazar tarafından çizilen şekliyle sunmaktadır.



Şekil 2.15: Yangında açığa çıkan ısının zamana göre değişimi.

Başlangıçta ısı, yakıt ve oksijenin bir araya gelmesi sonucu tutuşma olur ve yangın başlar. Başlangıç aşamasındaki geleneksel anlamda bir yangının gelişimi yakıtının yapısına ve bileşimine göre değişiklik gösterir. Öncelikle alevlerin ilk açığa çıktığı bölge etrafındaki yanıcı malzemeler hem alevin yüzeyden direk ilerlemesi hem de sağladığı radyasyon etkisiyle ısınarak yanmaya başlamasına neden olur. Sıcak gazlardan ve alevden meydana gelen bir sıcak madde sütunu bölümün daha soğuk havası ile karışır ve doğrudan ısı alışverişi ile ortamdaki sıcaklığı artırır. Buraya kadarki ilerleme tutuşma olarak da adlandırılabilir ve yangın başlayan bölüm etrafında yayılabileceği uygun yakıtlara rastlamazsa kendi kendine sönmeye ihtimali vardır. Bu aşama, yangının fark edilerek bastırılması veya ortamdaki kaçılması için son güvenli imkânı sunar. Başlangıç evresinden büyüme evresine geçişte işaretler çok net değildir ancak önceki bölümde bahsedildiği gibi, bir noktada sıcak sütun tavana erişecek kadar büyüdüğünde, tavan tarafından yükselmesi engellenen sıcak gazlar oda içinde yatay düzlemde de hareket eder ve ısı akışı çok daha geniş bir alanda gerçekleşmeye başlar [28, 29].

Ortamda yeterli oksijen varsa, ki genel kullanım ve yaşam alanlarındaki klasik havalandırma şartları yeterli oksijeni sağlayacaktır, yangın çok daha hızlı büyümeye başlar. Daha fazla yakıt olaya katıldıkça ısı çıkışı da daha büyük bir hızda yükselir. Bu evrede, basitçe, odada sıcaklıkları birbirinden farklı iki ana gaz külesinden bahsedilebilir: tavadan aşağı doğru büyümekte olan sıcak bir katman ile oda zemini

üzerinde kalan dikkate değer derecede daha soğuk olan katman. Isınan gazlar oda sınırları tarafından sıkıştırıldığı için sıcak bölümde oluşan yüksek basınç, sıcak kütleli aşağı ve odadaki açıklıklara doğru hareket etmeye iter. Bir yandan da zemin üzerinde oluşan kısmi alçak basınç, bu seviyede, oda dışından içeri taze hava akışına sebep olur. Bu iki katmanın birleştiği düzleme nötral düzlem denir. Nötral düzlemin yüksekliği dışarıdaki bir göz için, yangının büyüme aşamasının ne kadar ilerlediğinin işaretidir.

Alevler de sıcak gazlar ve duman gibi tavana çarparak eğilir ve yatay düzlemde yayılır. Sıcak türlerin teması ve açığa çıkan ısıl radyasyon yoluyla odadaki yüzey kaplamaları ve diğer cisimler kolayca tutuşabilecekleri yüksek sıcaklıklara ulaşır. Ortamdaki ısı piroliz ürünlerinin ve diğer tam oksitlenmemiş türlerin de yanmasını destekleyebilecek seviyeye eriştiğinde bu ürünler de alevler içinde yanmaya başlar. Bu bölümde daha önce konveksiyonel olan baskın ısı aktarım mekanizması rolü radyasyona geçer. Gelişme evresinin son kısmı yangının en tehlikeli anıdır. Genelde, tavan sıcaklığı 500-600 °C seviyelerine ulaştığında, zemine aktarılan ısı akısı da 15-20 kW/m<sup>2</sup> seviyelerinde olduğunda tüm açık yüzeylerin yangına katıldığı ve bir anda yangının büyük bir şiddetle yayılarak tüm hacmi kapladığı bir ana erişilir. Yangın gelişiminin bu aşaması ani alevlenme (flashover) ismiyle anılır. Dışarıdan bakıldığında ani alevlenme anında, yanan gazların açıklıklardan alevler içinde ve büyük bir hızla kaçmaya başladığı görülür [29,30].

Ani alevlenme yeterli oksijen veya yakıt olmadığında gerçekleşmez. Örneğin büyük bir odanın belli bir noktasında yanan bir mobilya etrafında yangının yayılacağı obje yoksa odayı ani alevlenme noktasına kadar ısıtamaz. Benzer şekilde kapısı ve pencereleri kapalı küçük bir odada çıkan bir yangında içerdeki oksijen büyüme aşamasında tükeneceğinden ani alevlenme için yeterli oksijen bulunmayabilir.

Ani alevlenme sonrası aşamada yangının kompartman içinde yayılabileceği her yere ulaştığı söylenebilir. Tüm kompartman alevler içinde olduğu için de yangın içeri giren oksijen miktarı tarafından sınırlanmış durumdadır. Yanmamış gazlar tavan seviyesinde birikmektedir ve bir açıklıktan oda dışına çıkıp oksijenle karşılaştıkları anda şiddetle alevlenirler. Tam olgunlaşmış evrede kompartman içindeki sıcaklıklar tipik olarak 700 ile 1200 °C arasındadır [29].

Kapalı bir kompartmandaki bir yangın ortamdaki yakıtı ya da oksijeni tükendiği zaman zayıflama evresine girer, ısı salım hızı düşer, sıcaklıklar da onu takiben yavaş yavaş azalır. Yakıtın tükenmesinin geri dönüşü olmamakla birlikte tükenen oksijen ile zayıflama evresine girmiş olan yangınlar büyük tehlike teşkil ederler. Oksijen tükense

de, ısıl parçalanma olayları (oksijensiz yanma) bir süre daha devam eder ve ortamdaki sıcaklığın düşmesine izin vermez. Üstelik karbon monoksit gibi tam yanmamış ürünlerin ortamdaki derişimi de artar. Böyle yangınlar içeri taze hava girmesiyle bir anda tekrar alevlenerek olgunlaşmış yangın evresine dönebilir. Bu yangınlar itfaiye müdahalesinin çok riskli olduğu ve müdahale öncesinde tüm şartların çok iyi analiz edilmesi gereken durumlardır.

Bu çalışmada tutuşma, alev ilerletme ve duman çıkışının daha çok gözleendiği yangının başlangıç ve büyüme evreleri esas alınmıştır.

#### **2.2.4. Yangın Deneyleri**

Temel olarak, yangın üçgeninde ya da dörtyüzlüsünde yer alan etkenlerden bir tanesinin ayrılması, ya da diğer etkenlerle ilişkisinin kesilmesi yangının başlamasını ya da devam etmesini engeller. Yangın evreleri bölümünde ifade edilen kompartman içi sıcaklıklar ve yangının yayılma riski göz önüne alındığında hızlı eyleme geçmek bir hayli önemlidir. Yangına karşı alınacak tüm eylemler onu başlangıç veya büyüme aşamasında yakalamak, bu aşamalar geçildiyse de bir yerde hapsedmek üstüne kuruludur. Pratikte bunu sağlamak için alınacak önlemler uygulama yapılarına göre etken ve edilgen olarak ikiye ayrılır.

Etken önlemler isminden de anlaşılabilceği gibi yangına karşı bir efor veya hareket içerir. Eyleme geçmeden önce yangının fark edilmesi için dizayn edilmiş sistemler de bu konu altında ele alınır. Yangını bastırmak için oksijenle yakıtın bağlantısının kesilmesi en yaygın yangın bastırma yöntemlerinin temelidir. Bu su, karbondioksit, köpük gibi malzemelerle yakıtın yüzeyinin elle ya da otomatik sistemler yardımıyla kaplanması ile gerçekleştirilir. Başka bir yangın baskılama sistemi örneği ilgili kompartmanın oksijenden arındırılmasıdır. Bu uygulama ortama havalandırma sisteminden ya da bu iş için özel hazırlanmış sistemlerden CO<sub>2</sub> veya N<sub>2</sub> sağlayarak oksijen derişiminin azaltılması ile gerçekleştirilir. Etken yangın önlemleri, malzemelerin yapı veya kimyasıyla birincil dereceden ilgili değildir. Bu nedenle bu tez çalışmasının ilgi alanının dışında kalmaktadır ve daha fazla üzerinde durulmayacaktır.

Edilgen yangın güvenliği önlemleri öncelikle yapı tasarımı ile ilgilidir. Hem mimari tasarım anlamında hem de yapıda kullanılan malzemelerin özellikleri

anlamında yangına karşı yapılan çalışmalar edilgen önlemler olarak değerlendirilir. Bu sebeple de edilgen yangın güvenliği disiplinler arası bir çalışma alanıdır. Malzeme bilimi ve genel olarak yangın test disiplini bu konuda mimari tasarımın ihtiyacı olan:

- Yangının kompartmanlar arasında hareketini zorlaştırıcı materyaller ve
- Yangının bir kompartmanda hapsedilerek belirli süre ile dışarı sirayet etmesini engelleyici bina elemanlarını sağlayabilmek;
- Malzemelerin yangın evreleri sırasında nasıl bir davranış göstereceğini tahmin edebilmek amacıyla çalışır.

Mimari tasarım da kullanılacak malzemeleri, binanın yangın riskini, binada bulunacak insan sayısını birlikte değerlendirerek bina bölümlerini daha küçük kompartmanlara ayırır ve bir yangın durumunda insanların hızla ulaşabilecekleri güvenli alanlar ve kaçış yolları tasarlar.

Yangın testleri ve genel anlamda edilgen yangın güvenliği başlangıçta yalnızca itfaiyeciler ile yapı ve malzeme mühendislik disiplinlerin ilgilendiği bir yan dal olarak ortaya çıkmıştır. Günümüzde ise kendi başına yüklü bir literatürü olan ayrı bir mühendislik alanı olduğunu söylemek mümkündür. Bu disiplin, malzemelerin ve bina elemanlarının yangın durumundaki davranışlarını incelemek üzere geliştirilmiş ya da başka disiplinlerden devşirilmiş birçok yöntemi kapsar. Temel literatürde yangın testleri, ilgilendikleri yangın evresine göre yangına tepki ve yangına dayanım olmak üzere ikiye ayrılır. Bu iki kavram sektörle sürekli temas halindeki insanlar tarafından bile birbirine karıştırılabilmektedir. Yangına tepki yöntemleri, malzemelerin, yangının ani alevlenme öncesi aşamalarında nasıl davranacağını belirlemek üzerine kuruludur, bu nedenle genellikle malzemelerin doğası ve fiziksel formlarıyla doğrudan ilişkilidir. Yangına dayanım ise duvar, kapı, pencere gibi bina elemanlarının bir kompartmanda olgunlaşmış bir yangını hapsedebilme yetilerinin saptandığı yöntemleri ifade eder.

### **2.2.5. Yangına Tepkiye Genel Bakış**

Yangına tepki bir malzeme ya da sistemin, özellikle ilk aşamalarında, yangının gelişimine ya da yayılmasına nasıl bir katkısı olacağının ortaya çıkarılması ile ilgili unsurları ifade eder.

Bir malzeme ya da sistemin, gelişmekte olan bir yangın karşısında, tutuşma kolaylığı, yanma sonucu açığa çıkan enerji, yüzeyden alev yayılması gibi karakteristik özellikleri insanların yangın bölgesini tahliye olanaklarını doğrudan etkiler. Diğer bir deyişle ilk aşamalarda yangının fark edilmesi ve yangın çıkan bölümden insanların bölümü boşaltmaları belirli bir zaman alacağından, yapı malzemelerinin en azından bu süre içinde yangının yayılmasını kabul edilebilir düzeyde tutması beklenir.

Bu beklenti ülkemizde “Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik” ile yasal zemine oturtulmuştur. Yönetmelik ile yapı malzemesi olarak değerlendirilecek bütün materyal ve sistemlerin yangına tepki sınıflarının Avrupa Yangına Tepki Sınıflandırma Sistemine (EUROCLASS) uygun olarak belirlenmesi zorunlu tutulmuştur. İlgili sınıflandırma TS EN 13501-1 standardına uygun olarak yapılır [31].

EUROCLASS sınıflandırma sistemi birçok değişkeni bir arada tarayarak malzemeleri yangına ısı ve yayılma açısından katkılarına göre 7, duman oluşturma özelliklerine göre 3, yanar halde damlalar oluşturma özelliklerine göre de 3 ayrı sınıfta değerlendirmek üzere oluşturulmuş oldukça kapsamlı bir sistemdir. Yangına tepki kavramının ruhunu tam olarak yansıtmaması ve bunu gerçek dünyada karşılaştırılabilir somut ölçütler halinde ortaya koyması açısından oldukça iyi tasarlanmıştır. Tablo 2.2’de EUROCLASS sistemi kapsamındaki testlerde temsil edilen yangın senaryoları, sınıflar ve örnek ürünlerle birlikte sunulmuştur.

Tablo 2.2: Yapı malzemelerinin TS EN 13501-1 standardına göre yangına tepki sınıfları, performans açıklamaları, temsil edilen yangın senaryoları ve örnek ürünler.

Sınıf	Performans açıklaması	Temsil edilen yangın	Isıl etki	Örnek ürünler
A1	Yangına katkı yok	Tam olgunlaşmış yangın	En azından 60 kW/m <sup>2</sup>	Doğal taşlar, çimento esaslı ürünler, seramikler
A2	Yangına çok sınırlı katkı	Tam olgunlaşmış yangın	En azından 60 kW/m <sup>2</sup>	Anorganik dolgulu alüminyum kompozit levhalar, alçıpan levhalar
B	Yangına çok sınırlı katkı	Bölme içinde yanan bir nesne	Sınırlı bir alanda 40 kW/m <sup>2</sup>	PU ve PIR dolgulu Sandviç paneller, organik esaslı yalıtım levhası içeren ETICSler, Epoksiler
C	Yangına sınırlı katkı	Bölme içinde yanan bir nesne	Sınırlı bir alanda 40 kW/m <sup>2</sup>	Yangın geciktirici katılmış ahşap esaslı levhalar, fenolik köpükler
D	Yangına kabul edilebilir katkı	Bölme içinde yanan bir nesne	Sınırlı bir alanda 40 kW/m <sup>2</sup>	Ahşap levhalar, polietilen dolgulu alüminyum kompozit levhalar
E	Yangına kabul edilebilir katkı	Küçük bir alev ile temas	20 mm yükseklikte tek bir alev	EPS; XPS, Polietilen köpük, Epoksiler

Son güncellemesi 13 Temmuz 2015 tarihinde gerçekleşmiş olan Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik'te yangına tepki sınıfları ve bu sınıflar yönetmelik içinde ifade edilirken kullanılan sözel ifadeler, aynı yönetmeliğin Ek 2ç'si altında sunulduğu şekliyle Tablo 2.3'te verilmiştir [32].

Tablo 2.3: Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik'in Ek 2ç bölümünde ifade edilen döşemeler dışındaki yapı malzemeleri için yanıcılık sınıfları.

Malzemenin Yanıcılık Özelliği	TS EN 13501-1
Hiç Yanmaz	A1
Zor Yanıcı	A2 - s1, d0
	B, C - s1, d0
Zor Alevlenici	A2 - s2, d0
	A2, B, C - s3, d0
	A2, B, C - s1, d1
	A2, B, C - s1, d2
(en az)	A2, B, C - s3, d2
	D - s1, d0
	D - s2, d0
	D - s3, d0
Normal Alevlenici	E
	D - s1, d2
	D - s2, d2
	D - s3, d2
(en az)	E - d2
Kolay Alevlenici	F

Yönetmelikle yapılarda kullanılacak malzemelerin en azından normal alevlenici özellikte olması zorunlu tutulmuştur. Bunun yanında cephe kaplamaları ve özel amaçlı belirli bir insan sayısından daha fazlasını barındıran binalarda iç kaplamalar ile atık su boru sistemleri için aşağıdaki özel ifadeler yer almaktadır:

Yangına tepki ile ilgili düzenlemeler taşımacılık sektöründe de olmazsa olmaz halini almıştır. Otomotiv ve havacılık sektörlerinin kendine özgü yangına tepki ölçütleri ve testleri bulunmaktadır. Bu konuda en oturmuş standartlar ise kuşkusuz demiryolları taşımacılığındadır. Sektörün dünyadaki üç lokomotifini olan Uzak Doğu, ABD ve Avrupa Birliği konuyla ilgili ikinci dünya savaşı sonrası yıllarda kendi standartlarını ortaya koyarak dünya çapında bir güvenlik ağı ortaya çıkarmışlardır. Bu sene içinde Avrupa Standartlarını kullanan ülkelerde yürürlüğe girmesi zorunlu hale gelen TS EN 45545 serisi standartlar Avrupa'daki çok sayıda standardın incelenmesi ve tek çatı altında toplanması amacıyla uzun yıllar süren bir çalışmanın sonucudur

[33]. Denizcilik ile ilgili testlerin de demiryolları ile ortak testleri olup IMO (International Maritime Organization) tarafından yayınlanmış ve deniz taşımacılığında faaliyet gösteren her taşıt için zorunlu olan yangın test prosedürlerine (IMO FTP CODE) uygun malzeme kullanımı esastır. Bu gibi belirli konularda kendi yönetmeliklerini AB regülasyonlarına uygun olarak düzenleyen ülkemizde de bu standartların yasal olarak şart haline gelmesi fazla uzak değildir.

TS EN 13501-1, TS EN 45545-2 ve IMO FTP CODE 2010 standartları kendi aralarında birçok benzerlik taşıdığı gibi belirli deney yöntemleri de ortaktır. Bu tez çalışmasının deneysel bölümü kapsamında planlanan deneylerden, sınırlayıcı oksijen indisinin belirlenmesi ve yangın sınıflandırması ile ısı salım hızının ortaya çıkarılması yöntemleri, TS EN 45545-2:2013+A1:2015 standardı içinde demiryolları araçlarının yapımında kullanılacak malzemelerin kullanım yerlerine göre yangına tepki performanslarının belirlenmesi amacıyla atıf yapılan deney yöntemlerinden ikisidir. Dolayısıyla her ne kadar yapı malzemesi olarak epoksilerin kullanımına odaklanılmış olsa da, taşımacılık sektörüyle de bağlantılı olduğunu söylemek yanlış olmayacaktır.

Standardı ne olursa olsun, yangına tepki deney yöntemlerinin genel olarak ortaya çıkarmaya çalıştığı belli başlı özellikler aşağıda sıralanmıştır:

- Tutuşma kolaylığı
- Alev yayılma davranışı
- Yanma sonucu açığa çıkan ısı rejimi (ısı miktarının zamana göre değişimi)
- Yanma sonucu açığa çıkan duman rejimi
- Yanma ürünlerinin zehirliliği

Deney yöntemleri genellikle belirtilen davranışlardan bir kısmını bir arada analiz etmek üzere tasarlanmıştır.

## **2.2.6. Tutuşma Kolaylığı**

Bir sıvı ya da katının tutuşması, yüzeyindeki sıcaklığın, buhar halinde yanıcı türlerin açığa çıkmasına, tutuşmasına ve bir alevi destekleyecek hızda oluşmaya devam etmesine yetecek seviyeye erişmesi ile gerçekleşir. Katı yakıtlarda buhar halindeki yanıcıların açığa çıkması kiymasal parçalanma süreçlerini gerektirdiğinden

bu sıcaklıklar görece yüksek değerlerdedir. Genellikle katı yakıtlar için alevlenme noktası denen bu sıcaklık değeri 300 °C'nin üzerindedir [34].

Doalısıyla, katı bir malzemenin tutuşma kolaylığı yüzey sıcaklığının alevlenme noktasına erişmesinin kolaylığına bağlıdır. Yangında tutuşma yüzeyin radyasyona maruz kalması veya sıcak gazlar ve/veya alev ile konveksiyonel olarak ısınması ile gerçekleşir. Bu olay, parçalanma reaksiyonlarının kimyasından ziyade, katının kalınlık, ısıl iletkenlik, yoğunluk, ısı kapasitesi gibi fiziksel özelliklerine bağlıdır. İnce katılar kolayca tutuşturulabilir çünkü ısıyı iletcekleri fazla bir kütle mevcut değildir. Kalın katılar ise ısıyı yüzeylerinden içe doğru yayarak yüzey sıcaklığının birden yükselmesini engelleyip, sıcaklığı belirli bir dengede tutabilir ve daha zor tutuşurlar. Katının yoğun olması ve ısıl iletkenliğinin yüksek olması da tutuşmayı zorlaştırır. Yoğunluk arttıkça ısının yayılacağı kütle miktarı artar, ısıl iletkenlik arttıkça da malzemenin yüzeydeki ısıyı iletmesi hızlanır.

Ortamdaki oksijen miktarı da tutuşma kolaylığı üzerinde etkilidir. Malzemeler fiziksel formlarındaki gözenek yoğunluğuna ve kimyasal yapılarına bağlı olarak ortamdaki oksijen derişimine farklı tepkiler gösterirler. Genel olarak, her malzeme için karakteristik bir sınırlayıcı oksijen indisi değerinden bahsedilebilir. Bu değer malzemenin belirli bir ortam sıcaklığında, standart bir alev kaynağı ile tutuşturulduktan sonra alevli ya da alevsiz yanmayı destekleyebildiği en düşük oksijen derişimini ifade eder. Polimerler için sınırlayıcı oksijen indisi oldukça karakteristiktir. Bazı malzemeler oda sıcaklığında, atmosferik şartlarda kolayca tutuşurken, bazıları daha yüksek derişimlerde oksijene ihtiyaç duyar.

### **2.2.7. Alev Yayılması**

Yangının büyümesinden sorumlu en önemli bileşenlerden biri alevlerin art arda yerleştirilmiş yanıcı yüzeyler üzerinde yayılma hızıdır. Bu yüzeyler yalnızca döşeme kaplamaları olarak değerlendirilmez, düşey elemanlar da dikkate alınır. Alev yayılması yangına tepki bakış açısıyla yanıcı bir yüzey üzerinde, yanındaki henüz tutuşmamış bölümü tutuşturucu etki yapabilecek sürekli bir alev çizgisi ile temsil edilir. Yayılma hızı, büyük oranda malzemenin tutuşma kolaylığı üzerinde etkili olan fiziksel özelliklerine bağlıdır [34].

Alevlerin ve yanma ürünlerinin sıcaklığı yüksek olduğundan doğal olarak yukarı yönelirler, yukarı yönde yer alan malzemeler doğrudan alevlerle ısı alışverişi içinde olduğundan bu yönde alev yayılması en hızlı ve tehlikeli olanıdır. Daha önceki bölümlerde değinildiği üzere, düşey düzlemdeki alev yayılması bir engelle karşılaştığında yatay düzleme yönelir.

Yayılma hızı ayrıca yüzey üzerine düşen radyan ısı akısı ile de yakından ilişkilidir. Bir kompartman yangınında, radyasyon etkisinde kalan yüzeyler tutuşma sıcaklığına eriştiklerinden alevle karşılaştıklarında kolayca alev alabilirler. Ayrıca yalnızca radyasyon etkisiyle aleve dokunmadan tutuşma da mümkündür. Sonucunda ani alevlenme olayının en önemli sorumlusu alev yayılmasıdır [34].

### **2.2.8. Yanma Sonucu Açığa Çıkan Isı Rejimi**

Bir malzemenin yangının gelişimine ne kadar katkıda bulunduğunun en önemli ölçüsü yanması sonucunda açığa çıkardığı ısıdır.

Analitik yöntemlerle malzemelerin ısıl parçalanma sonucu açığa çıkardıkları ısının belirlenmesi (kalorimetri) ve ısıl parçalanma sürecindeki kütle kaybı hareketleri (termogravimetrik analiz) uzun yıllardır süregelen oldukça kullanışlı deneysel kimya uygulamalarıdır. Ancak bu uygulamalar yangın bilimi söz konusu olduğunda kontrol edilmesi mümkün olmayan değişkenlerin çokluğundan ötürü sonuçları gerçek dünyaya uyarlama (modelleme) konusunda yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle araştırmacılar ısıl parçalanma davranışının yangına katkısının belirlenmesinde malzeme yüzeyine uygulanan ısıl etki, reaksiyon ortamının doğal hava akışı gibi belirli şartların kontrol edildiği ve sonuçta malzemenin yanması sonucu zamana bağlı bir şekilde açığa çıkan ısının belirlendiği deney yöntemleri ortaya çıkarmışlardır. Bu yöntemler de yine kalorimetrik yöntemlerdir ancak malzemenin ısıl parçalanma reaksiyonlarının yanında fiziksel özelliklerinden kaynaklanan değişikliklerin de sonuca daha gerçekçi bir şekilde yansımaları söz konusudur.

Malzemenin yangın karşısında ortama saldıgı ısı rejiminin ölçüsü ısı salım hızı (Heat Release Rate, HRR) ismi ile anılır. Isı salım hızı yanmakta olan malzemenin deney süresince zamana bağlı olarak açığa çıkardığı enerjinin anbean ölçülmesi ile belirlenir [33]. SI birimi olarak ifadesi güç birimi olan Watt'tır ve birim zamanda (saniye) ölçülen enerji miktarını (Joule) gösterir.

Isı salım hızı değişkenini belirlemek için kullanılan yöntemlerde genel olarak iki farklı prensip söz konusudur. Birincisi açığa çıkan yanma ürünlerinin standart bir havalandırma kanalında yarattığı sıcaklık değişikliklerini kayıt altına almaktır. Yanma rejimi iyi bilinen akışkan yakıtlarla bu kanaldaki ısı aktarımlarının sebep olduğu sıcaklık değişimleri önceden kalibre edilir ve malzemenin ısıl rejiminin belirlenmesinde bu kalibrasyon değerleri kullanılır.

Diğer prensip oksijen tüketimine bağlı kalorimetri ismi ile anılır ve günümüzde en yaygın kullanılan ve kabul gören yöntemler bu prensibi kullanır. Bu prensip basitçe, organik maddelerde yanma reaksiyonlarında tüketilen oksijen miktarının ve reaksiyon sonucu açığa çıkan karbondioksit ile karbonmonoksit miktarının belirlenmesi esasına dayanır. Hassas havalandırma düzenekleri kullanılarak deney ortamında sürekli olarak belirli hızda hava akışı sağlanır. Akan bu havadan sürekli olarak belirli oranda örnekleme yapılır ve alınan örnekteki O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> ve CO derişimlerinin zamana bağlı değişimi kaydedilir. Yine önceden yanma rejimi iyi bilinen akışkan yakıtlar yardımıyla yapılan kalibrasyon değerleri ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak açığa çıkan enerjinin zamana bağlı grafiği ortaya çıkar.

### **2.2.9. Yanma Sonucu Açığa Çıkan Duman Rejimi**

Yangına katkı söz konusu olduğunda araştırılacak en önemli değişkenin ısı salım hızı olduğundan bahsetmiştik. Yangın durumunda can güvenliği söz konusu olduğunda, büyük resme daha geniş bir açıdan bakıldığında, yangının büyümesine katkısı bir yana, ortaya çıkan dumanın tahliye yollarını kapatması ve görüşü engellemesi en önemli risklerden biridir.

Elbette duman dolaylı yoldan yangının büyümesini etkiler, ancak tehlikenin daha büyüğü, dumanın çok hızlı hareket edebilmesinde yatar. Yangın sonucu açığa çıkan duman sıcak olduğundan oldukça hızlıdır, büyük hacimleri birden kaplayarak bu bölümler yangına katılmadan önce bile geçişi imkânsız kılabilir. Bu nedenle malzemelerin yangın karşısındaki davranışları incelenirken oluşturdukları dumanın karakteristikleri ve duman oluşturma hızı da dikkate alınması gereken en önemli değişkenlerden biridir.

Yangına tepki deney yöntemlerinde dumanla ilgili belirlemeleri yapabilmek için genellikle faydalanılan iki adet ana deney prensibinden bahsetmek mümkündür.

Bunların ilki sürekli bir hava akışı içinde ölçüm yapmaya dayalı iken ikincisi duman belirli bir sızdırmaz hacim içinde toplanarak gerçekleştirilir.

Birinci prensipte kısaca yanma ürünlerinin boyutları standart olan bir havalandırma kanalından akışı sağlanır. Bu kanalın belli bir noktasında yoğunluğu kontrol edilen hassas bir ışık kaynağı ve kaynağın tam karşısında bir foton sayıcı dedektörden yardım alınarak kanaldan geçen dumanın ne kadar ışığı alıkoyduğu ortaya çıkarılır. Diğer prensip kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde ise, malzemenin açığa çıkan yanma ürünleri büyükçe bir hacim içinde sürekli olarak biriktirilir ve bu hacim içinden geçirilen ışının duman tarafından alıkonulması ölçülür.

### **2.2.10. Yanma Ürünlerinin Zehirliliği**

İstatistikler arasında kaybolmuş, çok kritik bir gerçek yangın sonucu ölüm ve yaralanma olaylarının önemli bir çoğunluğunu zehirlenme vakalarının oluşturduğudur. Daha önce de belirtildiği gibi gaz fazındaki yanma ürünleri yangından çok daha hızlı hareket eder. Bu ürünler duman gibi görüşü engelleyecek küçük katı parçacıklar içerebildikleri gibi tamamen şeffaf gizli tehlikeler de barındırabilmektedir.

Tipik yangınlarda açığa çıkan CO, CO<sub>2</sub>, HCN, HCl, HBr, HF, NO<sub>x</sub>, akrolein, formaldehit gibi yanma ürünleri farklı mekanizmalarla insan vücudunda gerçekleşen belirli hayati süreçleri engeller ve kalıcı hasara sebep olabilirler. Bu gaz fazındaki ürünlerin tespit edilmesi ve miktarlarının karşılaştırmalı olarak belirlenmesi bu sebeple çok kritiktir.

Yangına tepki deney yöntemleri, genellikle duman ile ilgili belirlemeler yapılırken, ortamdaki örnek alma ve bu örneği analiz etme yoluyla yanma ürünlerinin zehirlilikleri ile ilgilenir. Belirlemeler, güncel ve optimum fayda/maliyet oranı sağlayan FTIR (Fourier Transform Infra Red) spektroskopisi kullanılarak yarı kantitatif ve kalitatif olarak yapılabildiği gibi, görece daha ilkel yöntemler kullanılarak yanma ürünlerinin özel kimyasal reaktifler içeren çözeltilerden geçirilmesi ile ortaya çıkan renk değişikliklerinden faydalanılarak yapılabilmektedir. Bunların yanında çok daha keskin ve doğru sonuç veren ancak çok yüksek maliyetli GCMS (Gaz Kromatografi-Kütle Spektroskopisi) analizleri yapmak da mümkündür.

### **3. DENEYSEL**

Bu bölümde giriş kısmında detaylı anlatılmaya çalışılan epoksi ile yanma deneylerinin çalışma içinde nasıl birleştirildiği, epoksi malzeme içinde değişen pigment konsantrasyonunun ve çeşidinin yanma davranışını etkileyip etkilemediği ile bazı karakteristik özelliklerin ne şekilde değişim gösterdiği gösterilmiştir. Önceki bölümlerde anlatıldığı üzere malzeme içindeki ufak değişiklikler son kullanımda ürünü bazen hafif bazense oldukça etkileyerek kullanıcının isteklerine hitap etmekte veya kullanıcının güven ile güvensizlik arasında gidip gelmesine sebep olmaktadır. Burada yapılan testlerin epoksilerde değişen pigment çeşidi ile konsantrasyonlarının yanma davranışı ve yangına tepki sınıfını değiştirip değiştirmediği, değiştiriyorsa da hangi derecede olduğu sonucuna varılabilecektir. Elde edilen sonuçlarla hâlihazırda standardizasyon kapsamında yapılan yangına tepki sınıflandırmasına da bir yön vermesi muhtemeldir.

#### **3.1. Kullanılan Malzeme Çeşitleri**

Epoksi kaplamalarda çok çeşitli reçine, sertleştirici ve katkı maddelerinin kullanılması çalışmada ana konu belirlendikten sonra malzeme seçimi açısından oldukça zor olmuştur. Bu çalışmadaki maksat yalnızca pigmentlerin değişimi ile ortaya çıkabilecek durumların araştırılması ve tüm uygulanacak numunelerin yanma testlerine ve diğer karakterizasyon testlerine uyması aşılması gereken bir problem olarak karşımıza çıkmıştır.

Araştırılan konu son kullanıma yönelik, endüstriyel bir ürüne ait özellikler olduğundan ana malzemelerin ve katkı maddelerinin temini özel bir boya üreticisi firma tarafından sağlanmıştır.

Test numunelerinin hazırlanması için kullanılan malzemeler Tablo 3.1’de verilmiştir:

Tablo 3.1: Tüm numunelerde ortak kullanılan malzemeler.

Malzeme	Özellik	
Tüm numunelerde ortak kullanılan malzemeler	Epoksi reçine Epikote Resin 828 (Hexion)	Kimyasal bileşim: Orta viskozite sıvı reçine (bisefanol A+epiklorhidrin). Viskozite, 25C: 12-14 Pa.s, ASTM D445 Epoksi endeksi: 5,26-5,42 mol / kg, ISO 3001 Epoksi eşdeğer ağırlığı Wt/(E): 184-190 g / mol, ISO 3001 Yoğunluk, 25C: 1,16 kg / l
	Sertleştirici: Ancamine 2760 (Evonik)	Kimyasal bileşim: Ortam sıcaklığında kullanılan modifiye sikloalifatik poliamin, sarı renkte sıvı Viskozite, 25°C: 250-400 mPa.s, Brookfield RVTD, spindle 4 Amin değeri, (mg KOH/g): 290-320 (perklorik asit titrasyonu ile) Özgül ağırlık [g / cm <sup>3</sup> ]: 1,04 Sertleştirici eşdeğer ağırlığı, Wt/(H): 95
	Pasta ezme reçinesi	Kimyasal bileşim: Düşük erime aralığına sahip, değiştirilmemiş bir orta molekül ağırlıklı epoksi reçinesinin ksilen çözeltisi. Viskozite, 25C: 5-12 Pa.s, DIN 53015 Epoksi endeksi: 2-2,25 mol / kg, ISO 3001 Epoksi eşdeğer ağırlığı: 445-500 g / mol, ISO 3001 Uçucu olmayan (2 saat / 140 ° C): % 74-76, ISO 3251
	Islatıcı	Kimyasal sınıfı: Yüksek moleküler ağırlıklı polimer çözeltisi Fiziksel formu: Sıvı Görünüş: kahverengimsi-sarımsı sıvı Aktif madde içeriği: Yaklaşık % 40 Çözücü: Metoksipropilasetat / dibazik ester, aromatik içermeyen 1: 1 Viskozite, 25°C: yaklaşık 100 mPa s
Her renkte farklı kullanılan malzemeler	Beyaz	Kimyasal sınıf: Alümina ve zirkonya bileşikleri ile işlenmiş mikronize rutil titanyum dioksit pigmenti TiO <sub>2</sub> içeriği [%]: 94 İlave bileşenler: Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , ZrO <sub>2</sub> Özgül yoğunluk [g / cm <sup>3</sup> ]: 4.1 Kütle yoğunluğu [kg / l]: yaklaşık. 0.5 Yağ emme: 23 g / 100 g
	Sarı (krom)	Kimyasal tipi: kurşun kromat ve kurşun sülfatın birlikte çökeltisi (krom sarı) Renk endeksi: Sarı pigment 34 CAS no: 1344-37-2 Yağ emme: 24 (TM 3104 ASTM D281-84) Özgül ağırlık: 5,59
	Sarı (oksit)	Kimyasal tipi: Sentetik demir hidroksit α-FeOOH Renk endeksi: Sarı pigment 42 (77492) CAS no: 51274-00-1 Yağ emme: 25-35 g / 100 g (TM 3104 ASTM D281-84)

Tablo 3.1: Devam.

Mavi	Ürün tipi: Cu Ftalosiyanın Renk indeksi: PB 15: 2, C.I.-No.: 74160 Yoğunluk: 1,5 g / cm <sup>3</sup> Özgül yüzey alanı: 57 m <sup>2</sup> / g Yağ emme: 64 g / 100 g Birincil parçacıkların ortalama boyutu [nm]: 60 Isı Kararlılığı [° C]: 200
Kırmızı	Ürün tipi: Organik pigment Renk indeksi: PR 48: 4/15865: 4 Kütle hacmi: 5,1 l / kg Yoğunluk: 1,6 g / cm <sup>3</sup> Özgül yüzey alanı: 54 m <sup>2</sup> / g Yağ emme: 63 g / 100 g Termal direnç: 160 C
Siyah	Ürün tipi: Karbon siyahı, inorganik renk pigmentleri, suda çözünmez Kimyasal bileşim: Karbon siyahı CAS numarası: 1333-86-4 Yoğunluk: 320 kg / m <sup>3</sup> Moleküler ağırlık: 12

### 3.2. Kullanılan Malzeme Miktarları, Hesaplamalar ve Uygulamalar

Epoksi kaplama ürünü hazırlanırken en önemli kriterlerin başında reçinenin epoksit içeriğidir ve genellikle epoksit sayısı olarak belirtilir ki 1 kg epoksi eşdeğer ağırlığıdır (Eq/kg). Bu da epoksideki 1 mol epoksitin karşılığı olan gram reçine ağırlığıdır (g/mol). Bu sayı veya eşdeğer ağırlık epoksinin reçine ile sertleştiricinin tepkime/kürlenme için gereken miktarlarını hesaplamak için kullanılır. Bu çalışmada kullanılan reçine ve sertleştirici için aşağıdaki gibi hesaplama yapılmış ve kürlenme için gerekli miktarlar belirlenmiştir.

- Epoksi Eşdeğer Ağırlığı (EEA): 190 g/mol
- Sertleştirici Eşdeğer Ağırlığı (SEA): 95 g/mol
- Kürlenme için gereken % sertleştirici miktarı için:  $\frac{SEA}{EEA} \times 100 = \frac{95}{190} \times 100 = 50$

Karışım içinde tam kürlenme olması için reçineye oranla %50 miktarında sertleştirici kullanılması gerekmektedir. Bu oran iki bileşenin 1:2 karşılığı olarak ifade edilebilir. 1 ağırlık birim sertleştirici ve 2 ağırlık birim reçine karıştırıldığında

reaksiyon artansız olarak gerçekleşebilecek ve istenilen malzeme özellikleri sağlanabilecektir.

Ana malzemeler olan reçine ve sertleştirici dışında bu çalışmaya konu olan renklendirici pastanın hazırlanması için miktarlar hesaplanmıştır. Renklendirme aşamasında öncelikle tek renk (beyaz) üzerinden pigment konsantrasyonları değiştirilerek testlerde kullanılacak numuneler hazırlanmıştır. Daha sonraki aşamada sabit konsantrasyonla farklı renk pigmentleri karıştırılarak numuneler hazırlanmıştır. Numuneler pigmentine veya pigment konsantrasyonuna göre kodlanarak tüm çalışma boyunca aynı koda sahip olacak şekilde hazırlanmıştır. Aşağıdaki tablo 3.1’de pasta içi malzemeler ve pasta ile ana malzemelerin karışımındaki pigment yüzdeleri hesaplanarak belirlenmiş ve karışımlar firma altyapısı kullanılarak hazırlanmıştır. Tablo 3.1’de belirtilen ağırlık değerleri reçine ve sertleştirici hesaba katılmadan, yalnızca renklendirici pasta içindeki pigmentlerin kütlece miktarlarıdır. Dolayısıyla pigmentlerin konsantrasyon değişimi yalnızca pasta içindeki konsantrasyon temel alınarak hesaplanmış ve uygulamaya koyulmuştur.

Tablo 3.2: Renklendirici pasta içinde kullanılan pigment miktarları.

Numune Kodu	Kütlece Konsantrasyonu	Pigment	Ağırlık* (g)
Beyaz 10	% 10	TiO <sub>2</sub>	6,70
Beyaz 30	% 30	TiO <sub>2</sub>	25,70
Beyaz 50	% 50	TiO <sub>2</sub>	60,00
Beyaz 70	% 70	TiO <sub>2</sub>	140,00
Beyaz 90	% 90	TiO <sub>2</sub>	540,00
Sarı Oksit	% 50	Sarı pigment 42	60,00
Sarı Krom	% 50	Sarı pigment 34	60,00
Kırmızı	% 50	Organik kırmızı PR 48:4/15865:4	60,00
Mavi	% 50	Cu Ftalosiyenin	60,00
Siyah	% 50	Karbon siyahı	60,00

\*Not: 32 g çözücü + 28 g pasta ezme reçinesi miktarlarına karşılık her numune için kullanılan pigment miktarları

Hazırlanan karışımlarda özellikle yüksek konsantrasyonlu beyaz renkteki numunelerin ezme aşamasında ezici pasta reçinesi karıştırılan titanyum dioksit miktarına az geldiği için ana reçineden de pasta karışımı sırasında eklenmiştir. Beyaz 70 ve Beyaz 90 kodlu numunelerin pasta karışımı hazırlama aşamaları diğer

numunelere göre daha zorlu olmuştur. Titanyum dioksit azar azar ilave edilerek karıştırılmıştır.

Ana renk pastaları Şekil 3.1’de görülebileceği üzere elde edildikten sonra reçineler eklenerek homojen hale gelinceye kadar karıştırıcı yardımıyla renk ve reçinenin tamamının bütünleşmesi sağlanmıştır. Reçineli renk pastaları hazırlandıktan sonra uygulamaya geçmeden evvel kapakları tam kapalı tutularak uygulama zamanına kadar beklemeye alınmıştır. Kapaklardan hava sızmasına özellikle dikkat edilmiştir.



Şekil 3.1: Renk pastaları (hazırlık tarihi 24.10.2018).

Epoksi kaplamalar endüstriyel uygulamalarda beton veya metal gibi yüzeylere uygulanan ve tek başına kullanılamayan ürünler olduğundan deney numuneleri için altlık (substrat) seçilmesi numune hazırlığında önemli bir aşama olmuştur. Performansına bakılacak deneyler yangın deneyleri olması sebebiyle TS EN 13238 – Mart 2010 “Bina ürünlerinin yangın deneylerine reaksiyonu- Tabakaların seçimi için genel kurallar ve şartlandırma işlemleri” standardı kılavuz alınarak altlık seçimi ve laboratuvar şartları belirlenmiştir.

Numune karışımlarının hazırlığı, numune uygulamaları ve kürlenme süresince laboratuvar şartları için yine TS EN 13238 standardı esas alınmıştır. Genel olarak yapı malzemeleri deneylerinde  $23^{\circ}C \pm 2^{\circ}C$  sıcaklık ve  $50 \pm 10\%$  nem ortam şartı aranmaktadır. Bu çalışmada da tüm uygulama, kürlenme ve deneyler için laboratuvar ortam şartı  $23^{\circ}C \pm 2^{\circ}C$  sıcaklık ve  $50 \pm 10\%$  nem olarak ayarlanmıştır.

Standartta metal altlıklar genellikle endüstriyel uygulamalarda çelik veya galvanizli alaşımlar olarak seçilmekle birlikte bu çalışma için oldukça pahalı ve şekil verilmesi

zor bir altlık çeşididir. Kalsiyum silikat levhalar ise beton yüzeyi temsil eden en dayanıklı malzeme olması olmasına rağmen yine pahalı olması, uygun yoğunluklarda bulunamaması ve işlenebilirliği zor olması sebepleriyle bu çalışmada tercih edilmemiştir. TS EN 13238 standardı tablo 1’de bulunan altlık çeşitlerinden bu çalışmadaki kullanıma en uygun olan standart alçıpan levha olarak belirlenmiştir. Kullanılan altlık levhaların özellikleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.3: Numune hazırlığında kullanılan altlık malzemenin özellikleri.

Standart alçıpan altlık	Özellikler
Uzunluk	2500 mm
Genişlik	1200 mm
Kalınlık	12,5 ± 0,5 mm
Yoğunluk	700 ± 100 kg/m <sup>3</sup>
Yangına Tepki Sınıfı	A2-s1,d0
Kenar Tipi	İnceltmiş kenar
Isıl iletkenlik değeri ( $\lambda$ )	0,25 W/mK
Renk	Beyaz
Ürün Standardı	TS EN 520 +A1 (Alçı Levhalar - Tarifler - Gereklere ve Deney Metotları)

Standart alçıpan altlık numunelerin uygulanacağı yüzey olarak beton yüzeyleri temsil ederek son kullanıma uygun bir simülasyon sağlayacaktır. Yangına Tepki sınıfının uygulanan numunedeki yüksek olması gerekir ki test edilen malzemeden önce yanmaya katılıp yanma yükünü ve sonuçları etkilememesi esastır. Standart alçıpan altlık birçok yanma deneyinde beton, çimento veya alçı yüzeyi temsil eden bir malzeme olması, ucuz ve kolayca şekil verilebilir olması sebebiyle bu çalışmaya uygun altlık olarak kabul edilmiştir.

Yapılacak olan deneyler için altlıkların boyutlandırılması ve şekillendirilmesi gerekmektedir. Deney standartları/kodları ve altlık/numune durumları aşağıdaki Tablo 3.4’te belirtilmiştir.

Tablo 3.4: Standart metotlar ve altlık/numune miktar ve boyutları.

<b>Deneyler</b>	<b>Altlık / numune miktarı</b>
<b>TS ISO 5658-2</b> Yangına tepki deneyleri - Alev Yayılması - Bölüm 2: Düşey olarak yerleştirilen yapı ürünlerinde yana doğru yayılma	150 mm x 800 mm boyutlarında kesilmiş alçıpan levha (her bir renk/deneme için 4 adet)
<b>TS ISO 5659-2</b> Plastikler- Duman oluşumu- Bölüm 2: Tek kabin deneyi ile optik yoğunluğun tayini	75 mm x 75 mm boyutlarında kesilmiş alçıpan levha (her bir renk/deneme için 3 adet)
<b>TS ISO 5660-1</b> Yangına tepki deneyleri - Isı salınma duman oluşturma ve kütle kayıp hızı - Bölüm 1: Isı salınma hızı (konik kalorimetre yöntemi)	100 mm x 100 mm boyutlarında kesilmiş alçıpan levha (her bir renk/deneme için 3 adet)
<b>TS EN ISO 1716</b> Yapı ürünlerinin yangına tepki deneyleri - Yanma ısısının tayini (kalorifik değer)	Her bir renk/deneme için 50 g toz haline getirilmiş (mekanik öğütme) Altlık ihtiyacı yoktur.
<b>TS EN ISO 4589-2 - LOI</b> Plâstikler- Oksijen indisi ile yanma özelliklerinin tayini- Bölüm 2: Ortam sıcaklığı tayini	Her bir renk/deneme için 150 mm uzunlukta ve 10 mm x 10 mm genişlik ve kalınlığında 15 adet çubuk Altlık ihtiyacı yoktur.

Büyük tam boy alçıpan levhadan her test metoduna göre ölçülerek kesilen altlıkların kenarları zımparalanarak düzgünleştirilmiş ve epoksi uygulamasına hazır hale getirilmiştir.

Uygulama çalışması 2 aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada yapılan uygulamada tek pigment üzerinden farklı konsantrasyonlarda karışım hazırlanmış ve altlıklara uygulanmıştır. Pigment konsantrasyonunun numune uygulamasını ve karakterini nasıl etkilediği sonucuna bakılarak testler için en ideal konsantrasyon belirlenmeye çalışılmıştır. Belirlenen konsantrasyon, ikinci aşama numunelerinde farklı pigmentlere aynı şekilde uygulanmıştır.

İlk aşamada pigment konsantrasyonunun değiştirilmesi amacıyla titanyum dioksit katkısının diğer pigmentlere göre yanma yüküne katkıda bulunmayan inert bir mineral olması, daha ucuz olması ve numune yüzeyinin çıplak gözle daha iyi gözlenebilmesi sebebiyle beyaz renk seçilmiştir. Uygulama öncesi hazırlanan pasta karışımları konsantrasyonlara göre sıralanmıştır. Uygulama kalınlığı zemin

kaplamalarında genel olarak 2 mm – 3 mm kalınlığında yapıldığı ve daha yüksek kalınlıklarda çok fazla ısı çıkaracağı tahmin edildiği için 3 mm olarak belirlenmiştir.

Endüstriyel uygulamalarda ve son kullanımda genellikle epoksi uygulamasından önce beton yüzey özelliklerine uyan bir astar ile zemin kaplamaya hazırlanmaktadır. Ancak bu çalışmada pigmentlerin değişimi ile ortaya çıkacak sonuçlar araştırıldığı ve fazladan astar uygulamasının yanma yüküne katkı sağlayacağı için astar uygulama yapılmamıştır; epoksi karışımları ham alçıpan üzerine direkt olarak uygulanmak üzere hazırlanmıştır. Alçıpan numune levhalarının üzerlerine hava tutularak tüm toz ve partiküllerden arındırılarak uygulamaya hazır hale getirilmiştir. Epoksi karışımı ilk etapta sıvı fazda olacağı ve altlık üzerinde yayılıp dökülme göstereceği için her bir alçıpan numunenin etrafı bantlar ile sarılıp aşağıdaki şekil 3.2'deki gibi uygulama alanı küçük havuzcuklar haline getirilmiştir.



Şekil 3.2: Numune altlıklarının ve karışımlarının hazırlanması.

Daha önceden hazırlanan % 10 (Beyaz 10 kodlu), % 30 (Beyaz 30 kodlu), %50 (Beyaz 50 kodlu), % 70 (Beyaz 70 kodlu) ve % 90 (Beyaz 90 kodlu) pigment konsantrasyonlu beyaz renk reçinelerine sırasıyla önceden hesaplaması yapıлып miktarı belirlenmiş sertleştirici malzeme eklenerek karıştırılmıştır. Her seferinde çevre koşullarından etkilenmemesi ve kirlilik oluşmaması amacıyla 1 kg kapasitesinde küçük kaplarda karışım hazırlanarak uygulama yapılmıştır. Karışımın her numune boyutunda 3 mm kalınlık sağlaması için gereken ağırlık miktarı belirlenerek her uygulamada aynı ağırlık üzerinden çalışılmıştır.

### 3.3. Uygulanan Test Metotları

#### 3.3.1. TS ISO 5660-1 Yangına tepki deneyleri - Isı salınma duman oluşturma ve kütle kayıp hızı - Bölüm 1: Isı salınma hızı (konik kalorimetre yöntemi)

Malzemelerin ısı dağılım karakterizasyonu için en çok tercih edilen metot konik kalorimetre metodudur. Malzemenin yanmaya karşı verdiği tepki, ısı salınım hızı, toplam ısı salınım miktarı, tutuşma/alev alma zamanı, tutuşma anındaki kritik ısı akısı, yanma sonucu ortaya çıkan duman içindeki belirli gazların konsantrasyonları ile kütle kayıp hızı gibi parametrelerin tek bir ölçümle belirlenebildiği özellikle mühendislik uygulamalarında en çok tercih edilen cihazdır. Bu çalışmada ısı salınım hızları ve ısı akıları için konik kalorimetre kullanılmış ve sırasıyla uygulanan testler ve hazırlıkları aşağıda belirtilmiştir.

- Numune boyutları: 100 mm x 100 mm
- Numune kalınlığı: 12,5 mm alçıpan + 3 mm epoksi kaplama
- Şartlandırma: 23° C ± 2° C sıcaklık ve % 50 ± % 10 nem (15 gün)
- Isı akısı: 50 kW/m<sup>2</sup>
- Sistem havalandırma akış hızı: 0,0239 m<sup>3</sup>/s
- Numunenin maruz kalan yüzey alanı: 0,008836 m<sup>2</sup>
- Sabitleme: Standart (Numune tutacağında tel ızgara kullanımı olmadan)

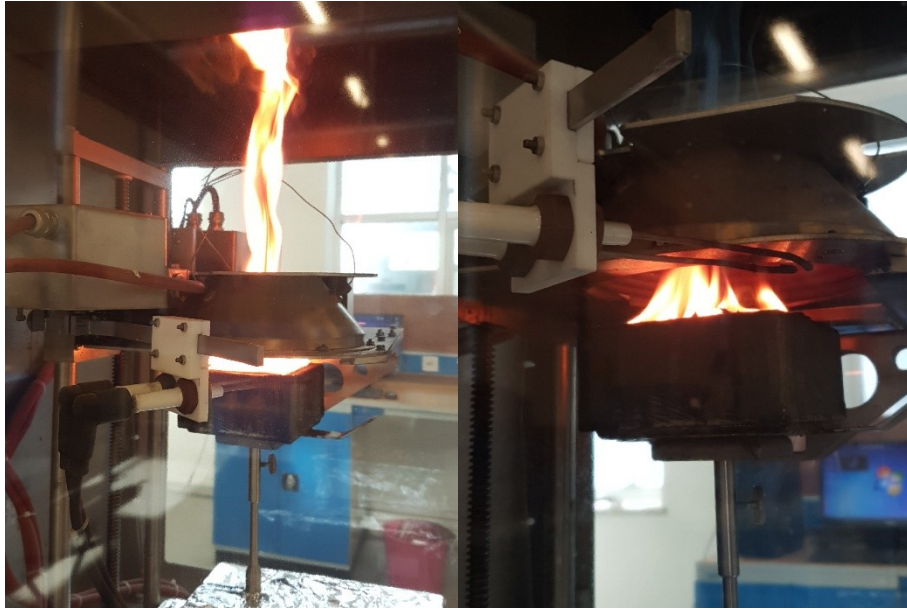
Konik kalorimetrede radyan ısı kaynağından numunenin merkezine düşen ısı akısı TS EN 45545-2 “Demiryolu uygulamaları - Demiryolu araçlarda Yangından korunma - Bölüm 2: malzeme ve bileşenlerinin yangın davranışları için gereksinimler” standardı kapsamında kompartıman içi kullanılan malzemelerde belirli tehlike ve ihtiyaç sınıfını karşılayacak şekilde kullanılan malzemelerde istenilen 50 kW/m<sup>2</sup> olarak seçilmiştir. Numunenin test için yerleştirildiği tutacaklar kare şeklinde üstten (106 ± 1) mm × (106 ± 1) mm, (25 ± 1) mm derinlikte ve (2,4 ± 0,15) mm et kalınlığında paslanmaz çeliktir ve şekil 3.3’te % 10 konsantrasyonda beyaz numunenin yerleştirildiği haliyle sabitlenmiş bir örneği mevcuttur. Numuneler tutacağı yerleştirilmeden önce 20 mikron kalınlığında alüminyum folyo ile sarılmaktadır. Tutacak içinde sabitlemenin düzgünleşmesi ve alt kısımda herhangi bir ısı akısı

oluşumunu engellemek amacıyla da alçıpan altına numune ile aynı boyutlarda taş yünü yerleştirilmiştir. Tüm deneyler bu yerleşim şekliyle yapılmıştır.



Şekil 3.3: Konik kalorimetre numune hazırlığı.

Öncelikle aynı pigmentin karışım içindeki konsantrasyon farkları ile hazırlanmış numunelerin testleri yapılmış, konsantrasyona bağlı sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır. Deneyler sırasında şekil 3.4'te görüldüğü üzere oldukça yüksek alevlenme, siyah duman ve ısı çıkışı gözlenmiştir.



Şekil 3.4: Konik kalorimetre deney görselleri.

Beyaz pigmentli numuneler sırasıyla Beyaz 10, Beyaz 30, Beyaz 50, Beyaz 70, Beyaz 90 kodlarıyla her bir konsantrasyondan, farklı pigmentlerle hazırlanmış numuneler her farklı renkten olmak üzere 3'er adet teste tabi tutulmuş ve 3 set ölçümün

ortalaması alınarak sonuçlanmıştır. Aynı şekilde farklı pigmentlerle hazırlanan numuneler 3'er adet teste tabi tutulmuş ve 3 set ölçümün ortalaması alınarak sonuçlandırılmıştır.

### **3.3.2. TS ISO 5660-2 Plastikler- Duman oluşumu- Bölüm 2: Tek kabin deneyi ile optik yoğunluğun tayini**

Bu test metodu malzemelerin açıkta kalan yüzeyleri üzerinden duman üretim miktarını ölçmek için belirlenmiştir. Esas olarak düz bir yüzeye sahip olan ve yatay düzlemde yerleştirildiğinde, pilot alevi uygulanarak veya uygulanmayarak, hiçbir açıklık içermeyen kapalı bir kabinde belirli ısı ışıma seviyelerine maruz kaldığında 25 mm'yi aşmayan numunelere uygulanabilir. Bu test yöntemi tüm plastiklere uygulanabilir ve diğer malzemelerin (ör. Lastikler, tekstil kaplamalar, boyalı yüzeyler, ahşap vs.) değerlendirilmesi için de kullanılabilir. Genel olarak bu test tarafından belirlenen optik yoğunluk değerlerinin (optik duman yoğunluğu), test edilen form ve kalınlıktaki numuneye veya montaj malzemesine özel olarak alınması dolayısıyla özel karakter ya da temel özellik olarak değerlendirilmemesi amaçlanmaktadır. Test, öncelikle bina içi uygulamalar ile trenlerde ve gemilerde araştırma & geliştirme ve yangın güvenliği mühendisliğinde kullanım için tasarlanmıştır; bina kodları veya diğer amaçlara yönelik derecelendirmelere temel teşkil etmemektedir. Diğer (gerçek) maruz kalma koşullarında, ısıya ve alev maruz kaldığında malzemeler tarafından oluşabilecek duman yoğunluğunu öngörmek için bir temel sağlanmamaktadır.

Bu metod için hazırlanan numune boyutları ve kullanılan parametreler aşağıda belirtilmiştir.

- Numune boyutları: 75 mm x 75 mm
- Numune kalınlığı: 12,5 mm alçıpan + 3 mm epoksi kaplama
- Şartlandırma: 23° C ± 2° C sıcaklık ve % 50 ± % 10 nem (15 gün)
- Isı akısı: 50 kW/m<sup>2</sup>
- Sistem havalandırma akış hızı: 0,0250 m<sup>3</sup>/s
- Numunenin maruz kalan yüzey alanı: 0,004970 m<sup>2</sup>
- Sabitleme: Standart (Numune tutacağında tel ızgara kullanımı olmadan)

Bir malzemeden duman üretiminin, numunenin maruz kaldığı ışımaya seviyesine göre değiştiği vurgulanmaktadır. Test metodunda belirtilen yöntemle elde edilen sonuçlar  $25 \text{ kW/m}^2$  ve  $50 \text{ kW/m}^2$  spesifik ışımaya seviyelerine maruz kalmaya dayanmaktadır. Bu çalışmada daha hızlı ve net sonuç alabilmek amacıyla  $50 \text{ kW/m}^2$  seviyesindeki ısı akısı (ışımaya seviyesi) tercih edilmiştir. Numunenin test için yerleştirildiği tutacaklar kare şeklinde üstten  $(85 \pm 1) \text{ mm} \times (85 \pm 1) \text{ mm}$ ,  $(25 \pm 1) \text{ mm}$  derinlikte ve  $(2,4 \pm 0,15) \text{ mm}$  et kalınlığında paslanmaz çeliktir. Numuneler tutacağı yerleştirilmeden önce 20 mikron kalınlığında alüminyum folyo ile sarılmaktadır. Tutacak içinde sabitlemenin düzgünleşmesi ve alt kısımda herhangi bir ısı akısı oluşumunu engellemek amacıyla da alçıpan altına numune ile aynı boyutlarda taş yünü yerleştirilmiştir. Tüm deneyler bu yerleşim şekliyle yapılmıştır. Hazırlanan numuneler, aşağıda Şekil 3.5'te görüntüsü verilen test kabini içine yatay olarak monte edilir ve  $50 \text{ kW/m}^2$ 'ye kadar seçilen sabit ışımaya seviyelerinde üst yüzeylerinde termal radyasyona maruz bırakılmıştır.



Şekil 3.5: Duman kabini ve FTIR Analizörü.

Çıkan duman, eş zamanlı fotometrik ekipman içeren haznede toplanmaktadır. Hiç duman yokken yüzde yüz alınan bir beyaz ışık kaynağı test süresince aynı seviyede açık tutulmaktadır.

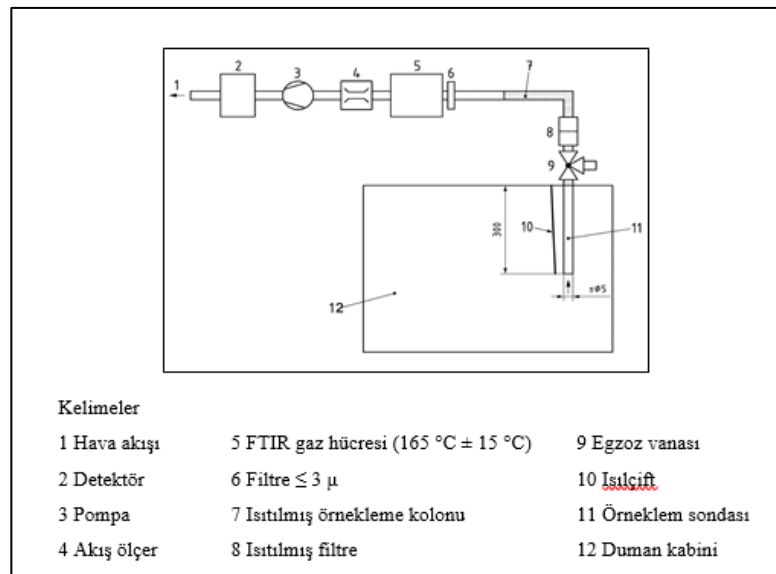
Tüm farklı konsantrasyon ve farklı pigment ile hazırlanmış olan numuneler kabinin içine yerleştirilerek aynı şekilde 3'er defa test edilmiş ve ortalama alınarak sonuçlandırılmıştır.

### 3.3.3. FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) Analizi

Bu metot, kabin içinde biriken yanma ürünü (duman) içerisinde numune alınarak FTIR yöntemiyle analiz edilmesi esasına dayanır. FTIR tekniği, diatomik ve poliatomik moleküller ile heteronükleer bağlardan oluşan bileşiklerin ayırt edilerek miktarlarının belirlenmesi için kullanılır. Cihaz aşağıda belirtilen özellikleri taşımaktadır [35]:

- Testin başlamasından itibaren malzemeler için belirlenmiş, kritik veya duman yoğunluğunun en yüksek olduğu zamanlarda interferogram alabilmelidir.
- Bu verileri absorpsiyon spektrumlarına çevirebilmeli ve sırasıyla analiz edebilmelidir.

Bilinen konsantrasyonlarda referans gaz karışımlarından elde edilen spektrumlarla, belirli gazların karakteristik absorpsiyon enerjilerindeki bilinen absorpsiyonunu, numuneden kaynaklanan gazların yaptığı absorpsiyon ile karşılaştırıp, ilgili gazdan ne kadar açığa çıktığını hesaplayabilmelidir. Test boyunca toplanan spektrumların analizi, gaz konsantrasyonunu verir [34].



Şekil 3.6: Duman Kabininden FTIR Analizi İçin Örneklem Alınmasının Şematik Gösterimi.

Tüm ölçümler sırasında duman kabini içinde biriken duman içerisinde FTIR analizörüne örnek alınmıştır. Örnekleme dumanın en yoğun olduğu pik seviyesinde 20 saniye boyunca analizöre gaz çekilerek yapılmış ve örnekleme süresi bittiğinde tekrar eski akış yönüne, diğer bir deyişle duman kabini içine yönlendirilmiştir. FTIR içerisinde yalnızca gaz örneklemesini analiz eden kristal ile içerisinde bulunan zehirli gaz kütüphanesi kullanılarak toksisite sonuçları elde edilmiştir.

### **3.3.4. TS ISO 5658- Yangın deneylerine karşı tepkime- Alev yayılması- Bölüm 2: Düşey olarak yerleştirilen yapı ürünlerinde yana doğru yayılma**

Düşey düzlemde yerleştirilen yapı ürünlerinin yüzey alanı boyunca alevlerin yana doğru yayılımını inceleyip ölçen bir test metodudur. Gerçek anlamda duvarların yangına maruz kalan yüzeyleri olan düz malzemeler, kompozit malzemeler ve/veya montajlı kısım da denilen ek yerlerinin performans kıyasının yapılabileceği bir yöntemdir.

Deney metodu, yayılma ısı akısının belirlenmiş bir alanında ışımaya maruz bırakılan ve pilot aleviyle yakılan numunelerin tutuşma zamanını ölçme, alevin yanıl yayılımı ve nihai söndürmeden oluşmaktadır. Işıma ve yayılan bir ısı akısı sabit bir radyan ısı kaynağı ile yapılmaktadır. Numunenin bir tarafı destek tabakası (altlık olan yüzey) ile alev aldırılmazken diğer tarafı (epoksi kaplı yüzey) alev maruz bırakılan, radyan ısı kaynağına bakan ve alev yayılmasına konu olan yüzeydir. Tutuşmayı takiben gelişen alevlenmeler kaydedilir ve kayıt; çeşitli mesafelere gitmesi için alınan değişken uzaklıklar cinsinden numunenin uzun kenarı boyunca yatay olarak, alevlerin ilerlemesine göre yapılır. Sonuçlar, zamana karşı alev ilerleme mesafesi, ısı yayılımına karşı alev cephe hızı, söndürmedeki kritik ısı yayılımı ve devamlı yanma için ortalama ısı olarak cihaz tarafından verilmekle birlikte bu çalışmada önemli olan parametreler söndürmedeki kritik ısı akısı (CFE) ile sürdürülebilir yanma için gereken ortalama ısıdır (Qsb).

Bu metod için hazırlanan numune boyutları ve kullanılan parametreler aşağıda belirtilmiştir:

- Numune boyutları:  $800 \left( \begin{smallmatrix} 0 \\ -5 \end{smallmatrix} \right) \text{ mm} \times 155 \left( \begin{smallmatrix} 0 \\ -5 \end{smallmatrix} \right) \text{ mm}$
- Numune kalınlığı: 12,5 mm alçıpan + 3 mm epoksi kaplama

- Şartlandırma:  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  sıcaklık ve  $\% 50 \pm \% 10$  nem (15 gün)
- Numune Tutucu: 850 mm x 160 mm boyutlarında paslanmaz çelik
- Pilot alevi: 230 mm uzunluğunda mavi alev
- Pilot alevde kullanılan gaz: %99.5 saflıkta ticari propan, hava karışımı
- Isı akısı: Numune boyunca 0-800 mm arası 0-50 kW/m<sup>2</sup>
- Sistem havalandırma akış hızı: 0,0250 m<sup>3</sup>/s
- Numunenin maruz kalan yüzey alanı: 0,124 m<sup>2</sup>
- Sabitleme: Standart (Numune tutacağında tel ızgara kullanımı olmadan)

Cihaz çalıştırılıp ısı akısı kalibrasyonu tamamlanır. Numuneler tutacağı yerleştirilmeden önce 20 mikron kalınlığında alüminyum folyo ile sarılır ve numune tutucusuna yerleştirilir. Bu sırada duman çekiş sistemi devreye alınır. Radyan ısı panelindeki ısı dağılımı dengeye geldiğinde pilot alevi yakılır. Numune deney konumuna yerleştirilir ve zaman sayacı başlatıldığı anda numunenin radyan ısı kaynağına doğru sürülerek pilot alevine teması sağlanır. Bu noktadan itibaren deney başlamıştır ve ilk tutuşma zamanı kaydedilir. Alev ilerlemesi yanal düzlemde sıfır noktasından başlayarak her 50 mm'lik yol kat ettiğinde zamanlar kaydedilir. Alevin ilerlemesinin durduğu numunenin merkez hattı boyunca zaman ve konum kaydedilir. Standart gereği 10 dakika boyunca maruz kalmadan sonra numune tutuşmazsa, numunede alev yayılmaz durmaz, sönmez ve herhangi bir tip alev gözlenmezse, yüzey alevi numunenin ucuna ulaşmazsa ve yerleştirildiğinde sadece bir konumdan yanar ve ön kısmındaki alev 30 dakika boyunca ilerlemezse deney sonlandırılır. Bu çalışmadaki numunelerde normal alev yayılması gözlemlenmiş ve deney sonlandırılmasına gerek kalmamıştır. Deney sırasında oluşan alev ilerlemesine örnek bir görüntü Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.7: Yanal alev yayılması deney düzeneğinin şematik gösterimi.

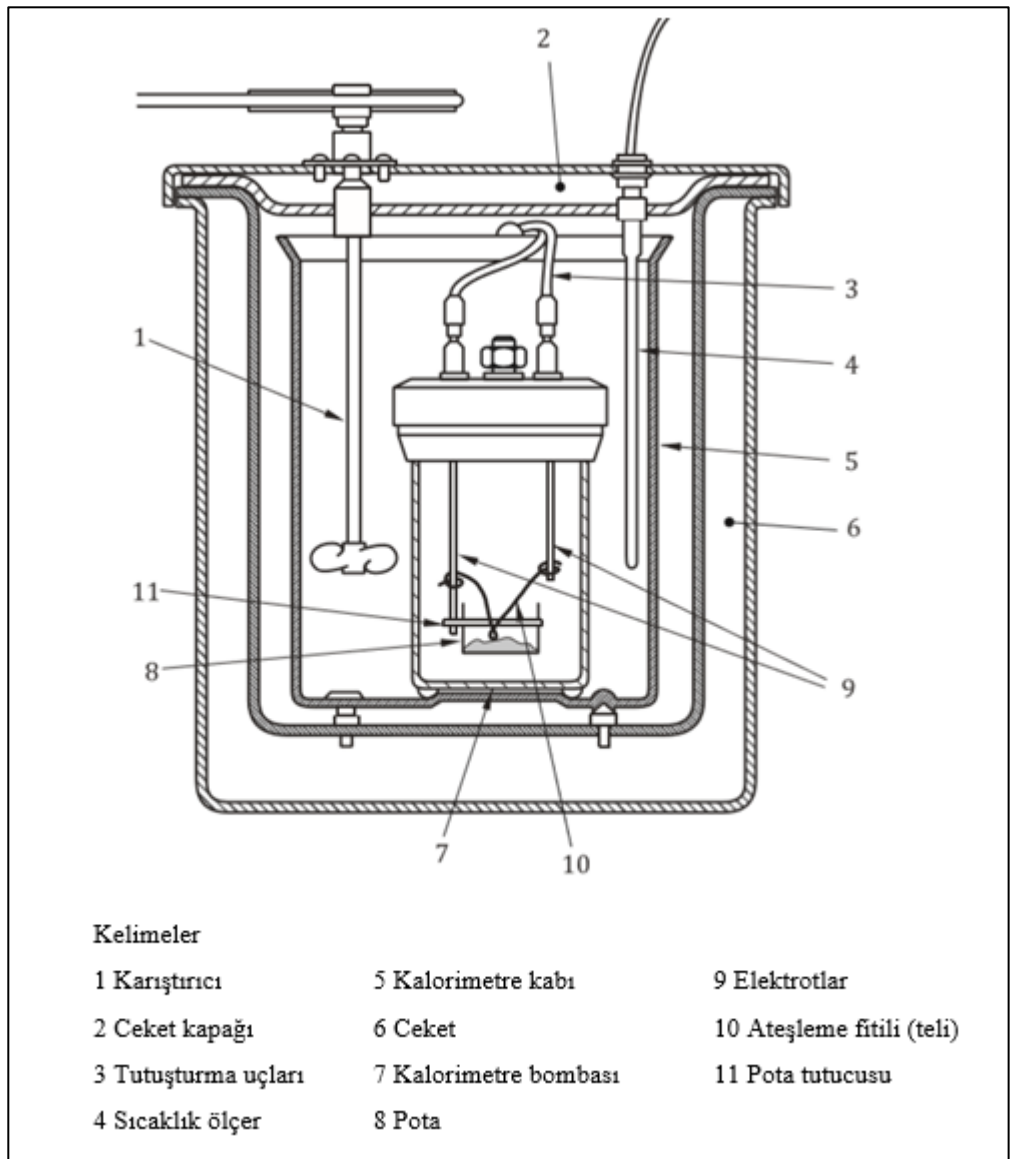
Standart metotta sonuçlar her 50 mm ilerleme ile yerinde ölçülen yayılma ısı akılarının terimleri olarak verilir. Bu sonuçlar değerlendirilirken maruz kalma sırasında ilerleme panelinin ısı alımı sonucundaki değişimler dikkate alınmaz. Bu çalışmada farklı konsantrasyondaki beyaz numuneler ile farklı pigmentlerle uygulanmış renkli numuneler sırasıyla 3'er defa teste tabi tutulmuş ve alınan 3 sonucun ortalama alev ilerleme sonuçları aşağıda belirtilmiştir. Bu sonuçlar sürekli yanma için ilk 150 mm ve sonraki 400 mm'lik uzunluğu içeren her bir sonraki 50 mm'lik aralıklarla ölçülen ısı değerlerinin ortalaması ile söndürmedeki kritik ısı akısı olarak ifade edilir.

Deney sırasında açık alev gözlemlendiğinden tüm alevlenme, tutuşma ve duman çıkışına karşı gerekli kişisel güvenlik tedbirleri alınmıştır.

### **3.3.5. TS EN ISO 1716- Yapı ürünlerinin yangına tepki deneyleri - Yanma ısısının tayini (kalorifik değer)**

Brüt yanma ısısının tayini olarak da bilinen bu metot bir bomba kalorimetrede (patlamalı ısı ölçer) sabit hacimli bir malzemenin brüt yanma ısısının ( $Q_{PCS}$ ) belirlenebilmesi için geliştirilmiştir. Bu yöntem ile kullanılan malzemenin kesinlikle tek bir bileşen veya homojen bir şekilde karışmış birkaç basit madde olmalıdır. Yanma ısısı olarak tabir edilen değer bir malzemenin birim kütlesinin tamamen yanmasıyla

ortaya çıkan ısı enerjidir. Brüt yanma ısı ise belirli koşullar altında yanma reaksiyonu tamamlandığında ve bu sırada açığa çıkan enerji ile bir üründeki suyu tamamen yoğunlaştırdığında ölçülen ısıdır. Brüt yanma ısı kilogram başına megajul olarak ifade edilir. Suyun sıvı halden gaz haline dönüştürülebilmesi için gereken ısı miktarına ise suyun buharlaşma gizli ısı denilmektedir. Bu yöntem belirli bir kütledeki test numunesinin sertifikalı bir yanma yardımcısıyla (benzoik asit) kalibreli bir bomba kalorimetrede sabit hacim ve analitik saflıkta oksijen atmosferinde yakılmasıdır. Bu şartlar altında belirlenen yanma ısı, ısı kaybı ile su buharı gizli ısı dikkate alınarak gözlenen sıcaklık artışı temelinde hesaplanır.



Şekil 3.8: Yanma Isısı Deney Düzeneginin Şematik Gösterimi.

Bombanın hacmi Şekil 3.8’de [36] verildiği gibi (  $300 \pm 50$  ) mL, kütlesi 3,25 kg’dan daha küçük ve mahfaza kalınlığı, gövde iç çapının en azından 1/10’u olarak tasarlanmıştır. Kapak contalarıyla birlikte 21 MPa’lık bir iç basınca dayanmaktadır.

Bu metot için hazırlanan numune miktarı ve kullanılan parametreler aşağıda belirtilmiştir.

Numune miktarı: Her bir numune için en az 20 g parça öğütülerek homojen toz haline getirilmiştir. Her deneme için 1 g olmak üzere bir numune için 5 tekrarlık (toplam 5 g) setler hazırlanmıştır.

- Şartlandırma:  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  sıcaklık ve  $\% 50 \pm \% 10$  nem (15 gün)
- Damıtık veya demineralize su
- Basıncılı oksijen, (saflık derecesi  $\geq \% 99,5$ )
- Referans yanma ısısı belirleyici: Benzoik asit tozu
- Yakma fitili: Beyaz selülozik pamuktan yapılan iplik

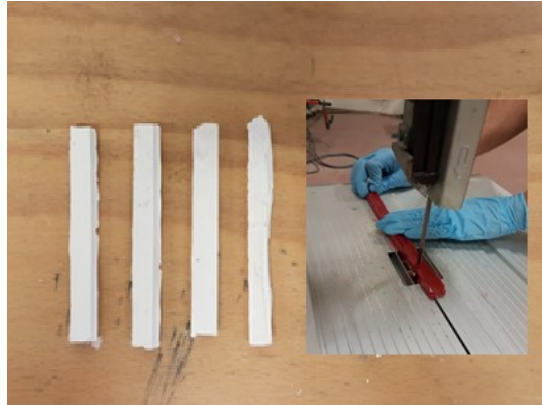
Numunelerin yüksek bir yanma ısısına sahip olduğu tahmin edildiği için, yanmayı kolaylaştırıcı maddeler ve/veya benzoik asit dâhil edilmemiştir. Hazırlanan tüm numuneler kalorimetrede yakılarak ölçüm sonuçları kaydedilmiştir. Münferit ölçüm sonuçlarının arasında binde 5’ten az çıkan 3 ölçüm sonucunun ortalaması alınarak her bir numune için brüt yanma ısısı hesaplanmıştır.

### **3.3.6. TS EN ISO 4589-2 Plâstikler- Oksijen indisi ile yanma özelliklerinin tayini- Bölüm 2: Ortam sıcaklığı tayini**

Bu deney metodu, belirli deney şartlarında, dik konumdaki deney numunelerinin yanmalarının devamı için, azot-oksijen karışımlarında bulunması gerekli en küçük oksijen konsantrasyonunun tayininde kullanılır ve plastiklerde en belirleyici karakterizasyon yöntemlerinden biridir. Karşılaştırma için, malzemenin oksijen indisi (OI) değerinin, verilen en küçük değerin üzerinde olup olmadığını belirlemek amacıyla da kullanılabilir. Bu metot genellikle bir malzeme tipinin veya formunun, gerçek yangın şartları altında arz edeceği yangın tehlikelerini tarif etmek veya değerlendirmekten daha çok özel bir uygulama alanı ile ilgili yangın tehlikesi değerlendirilirken, elde edilen sonuçlar, yangınla ilgili bütün faktörleri hesaba katan genel bir yaklaşımda, anlamlı bir katkı sağlamaktadır.

Prensip basitçe küçük bir deney numunesi, içerisinde yukarı doğru bir oksijen ve azot karışımı geçen şeffaf bir baca içine düşey olarak yerleştirilerek numunenin üst ucu tutuşturulması ve arkasından deney numunesinin yanma davranışı gözlenerek yanmanın devam süresi veya yanan deney numunesi uzunluğu, bu tür bir yanma için önceden belirlenmiş sınır değerlerle karşılaştırma şeklinde uygulanmaktadır. Farklı oksijen konsantrasyonlarında, bir seri deney numunesi kullanılarak yapılan testlerle, yanmanın devam etmesi için gerekli en küçük oksijen konsantrasyonu değeri tahmin edilir ve bu şekilde ilerlenir.

Test cihazı CONCEPT EQUIPMENT markalı klasik oksijen indeks modülüdür. Baca çıkış hızı, alev tutuşturucusu, numune tutucusu ve otomatik kalibrasyon özellikleri kendinden ayarlanabilmektedir. Dolayısıyla bu çalışmadaki en önemli detay numune boyutları ve homojenliğidir. Numune hazırlığı için kullanılan yöntem standardı içindeki çizelge 2'de [37] yer alan ve tipik kullanım olarak kalıplama malzemeleri özelinde belirlenmiş ilk form esas alınarak numuneler hazırlanmıştır. Epoksi hazırlığı ve şekil verilmesi görece diğer polimere göre daha zor olduğundan öncelikle küçük kanallarda uygulanmış daha sonra metotta istenilen boyutlara şekil 3.9'da görüleceği gibi testere ile dikdörtgen prizma biçiminde kesilerek düzgün boyutlandırılmıştır.



Şekil 3.9: Oksijen indisi numune hazırlığı.

Bu metot için hazırlanan numune boyutları ve kullanılan parametreler aşağıda belirtilmiştir.

- Numune boyutları: 150 mm x 10 mm ( $\pm 0,5$ ) x 4 mm ( $\pm 0,25$ ) Form I
- Şartlandırma: 23°C  $\pm$  2°C sıcaklık ve % 50  $\pm$  % 10 nem (15 gün)

- Sistem baca akış hızı: 40 mm/s ( $\pm 2$  mm/s)
- Basınçlı oksijen, (safılık derecesi  $\geq$  % 99,5)
- Sabitleme: Yok (Kendi kendine ayakta durabilen form)

Deneyler sırasıyla farklı konsantrasyonlardaki beyaz numuneler ve renkli numuneler olmaz üzere işlem A (üst yüzeyden tutuşturup bırakma tekniği) ile gerçekleştirilmiştir. Alevin görünür en alt kısmı her seferinde en fazla 30 saniye olmak kaydıyla her 5 saniyede bir süpürülerek ve numunenin yanıp yanmadığı kontrol edilerek uygulanmıştır. Standartta öngörüldüğü üzere ilk numuneye % 18 konsantrasyon ile başlanmış, takip eden testlerde bir önceki numunede bulunan oksijen konsantrasyonu ile başlanarak devam edilmiştir. Her numune üstten 130 mm seviyesinde işaretlenmiş ve alev bu noktaya gelinceye kadar test devam ettirilmiştir. İşlem A adı verilen üst yüzey ile tutuşturularak yapılan deneylerden birine ait örnek şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10: Oksijen indisi işlem A ile numune Beyaz 30 deney görüntüsü.

### **3.3.7. Yüzey Karakterizasyonu**

Bu çalışmaya konu olan epoksi malzeme, kaplama türünden bir yapı ürünü olması sebebiyle yüzey özelliklerinin değişimi de önem arz etmektedir. Daha önceki bölümlerde de belirtildiği üzere epoksi kaplamaların en önemli kullanım özelliklerinden biri fiziksel dayanıklılıktır ve bunun bir ölçüsü sertlik ile karakterize edilebilir. Hazırlanan numunelerde herhangi bir yüzey modifikasyon işlemi (parlatma, temizlik, zımparalama..vs) yapılmadığı ve direkt olarak bileşenler hazırlandığı anda uygulandığı ve bu şekilde son kullanıma hazır olduğundan yüzey sertliği malzemenin genel mekanik yapısı hakkında fikir verebilmektedir. İçerikte bulunan malzemelerin ürünün genel mekanik yapısına ve yüzey özelliklerine olan etkisi sertlik ölçümüyle elde edilebilir.

#### **3.3.7.1. TS EN ISO 868 - Plastikler ve ebonit- Batma sertliğinin durometre ile tayini (Shore sertliği)**

Bu çalışmada sertlik ölçümü için plastikler üzerinde en çok uygulanan yöntemlerden biri olan belli şartlar altında durometre ile batma derinliği ölçülerek elde edilen “Shore A” veya “Shore D” olarak nitelendirilen sonuçlardır. Shore A yumuşak, Shore D ise sert malzemeler için kullanılmaktadır. Batma sertliği malzemeye batma miktarıyla ters orantılı olarak viskoelastik özelliklere ve elastiklik modülüne göre değişmektedir. Ayrıca batma ucunun şekli, uygulanan kuvvet ve süresi batma derinliğini etkilediğinden bu çalışmadaki tüm numunelerde tek tip durometre (Shore D) kullanılmıştır.

Numuneler, ölçümlerin her bir kenardan en az 12 mm içerisinden yapılabilecek şekilde ayarlanabilmesi amacıyla 75 mm x 75 mm kare plakalar üzerine, metotta en az 6 mm kalınlık istenmesi sebebiyle 10 mm epoksi kaplanarak hazırlanmıştır. Her bir deney parçasında 10 mm aralıklarla 5 ayrı noktadan 15 saniyelik ölçümler gerçekleştirilmiştir.

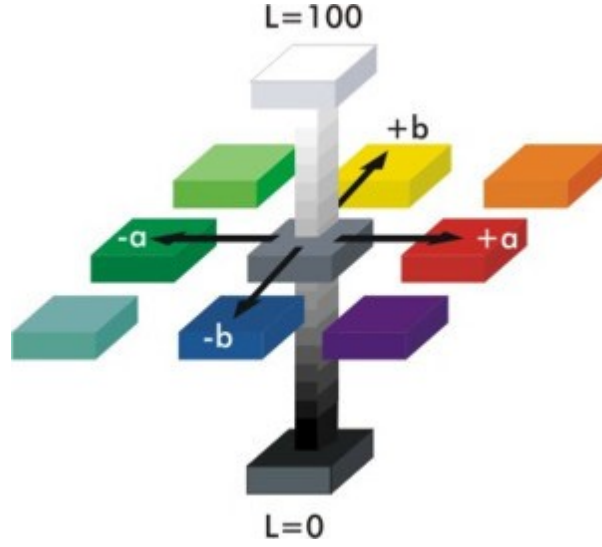
### 3.3.7.2. Hunter-Lab Renk Tayini

Bu çalışmaya esas konulardan biri de pigmentlerin değişimi ve renkler olması sebebiyle renk tayini de önem arz eden bir ölçüm olmuştur. Renk uzayı içinde sonsuz renk tonu elde edilebildiği bir gerçekken hangi renk tonu üzerinden deneylerin yapıldığının belirlenmesi, ayrıca aynı rengin farklı konsantrasyonlarında elde edilen açıklık ve koyuluk miktarının bilinmesi çalışmanın izlenebilirliği açısından önemlidir.

Bilindiği üzere her ortamın ışığı kırma açısının farklı olmasından yararlanılarak kırılma indisi prensibi üzerinden konsantrasyon, miktar..vs. gibi ölçümler yapılması “refraktometri” ile mümkün olmaktadır. Kırılma indisi her malzemeye özgü fiziksel bir özelliktir. Renkler ise ışığın farklı dalga boylarında yayınlanması ile oluşan bir özellik olduğundan refraktometrik yöntemlerle numune renkleri arasında karşılaştırmaya esas ölçümler yapılabilmektedir.

Renk ölçümleri genel olarak Munsell sistemi, Lovibond tindometresi, Hunter kolorimetresi, spektrofotometre gibi cihazlarla veya karşılaştırma ilkesine dayanan Renk Karşılaştırma Çözeltileri, Renkli Cam Filtreler, Standart Renkli Plastikler, Renk Skalaları gibi renk ölçme sistemleri ile renk tanımlama sistemleridir. (En yaygın kullanılan CIE (Uluslararası Aydınlatma Komisyonu) Lab sistemi). Bu çalışmada CIE - Lab renk uzayı üzerinden referans renkler belirlenmiş ve ölçüm alınmıştır.

CIE – Lab renk sistemi teorisi bir rengin aynı anda hem yeşil hem kırmızı veya hem sarı hem mavi olamayacağı varsayımı üzerinden dörtgensel bir düzlemde koordinatlarla matematiğe döken bir sistemdir. Kırmızı/yeşil ve sarı/mavi düzlemlerinde renk sayılarıyla tarif edilir. Şekil 3.11’deki üçlü uzay boşluğu üzerinden CIE  $L^*a^*b^*$ ’da bir rengi gösterirken,  $L^*$  (lightness) açıklığı,  $a^*$  kırmızı/yeşil düzlemdeki değerini ve  $b^*$  sarı/mavi düzlemdeki değerini gösterir [40].



Şekil 3.11: CIE L\*a\*b\* renk düzlemi.

Bu uzay sisteminde iki renk değeri arasında fark  $\Delta E$  (deltaE)'dir. CIE L\*a\*b\* renk düzleminde bulunan iki rengin (düzlemdeki iki noktanın) koordinatları arasındaki uzaklıktır.  $\Delta E$  ne kadar büyükse karşılaştırılan iki renk arasındaki fark da o kadar fazladır. CIE L\*a\*b\* sistemine göre, iki renk arasındaki renk farkı,

$$\Delta E = [(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2]^{1/2}$$

formülüne göre hesaplanır.

Karşılaştırmak için kullanılacak uluslararası referans renkler olan klasik RAL kodlu renkler kullanılmıştır. Ölçüm için kullanılan cihaz DATACOLOR 600 SPECTRUM spektrofotometresidir. Basitçe cihaza okutulan referans renkten sonra asıl ölçüm yapılmak istenen numune okutularak L\*a\*b sistemindeki yeri matematiksel olarak  $\Delta E$  şeklinde sonuçlar elde edilmiştir.

### 3.3.7.3. Optik Mikroskop İncelemesi

Epoksi kaplamalarda yüzey özelliklerinin önemli olduğu ve fiziksel, kimyasal, ışımsal her türlü etkiye dayanıklı olması gerektiği daha önceki bölümlerde vurgulanmıştır. Bu çerçevede yüzeyin bütünlük göstermesi, gözle görülebilen veya görülemeyen her türlü düzensizlikten arınmış olması istenir. Bu inceleme de görüntüleme ile mümkün olmuştur.

Nikon Eclipse marka L 150 model optik mikroskop ile sırasıyla tüm farklı konsantrasyonlar ve farklı pigmentler ile hazırlanan numuneler incelenmiş ve farklı büyütme oranlarında kaydedilmiştir.

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1. TS ISO 5660-1 Yangına tepki deneyleri - Isı salınma duman oluşturma ve kütle kayıp hızı - Bölüm 1: Isı salınma hızı (konik kalorimetre yöntemi)

Beyaz pigmentli numuneler sırasıyla Beyaz 10, Beyaz 30, Beyaz 50, Beyaz 70 ve Beyaz 90 olmak üzere her bir konsantrasyondan 3'er numune teste tabi tutulmuş ve 3 set ölçümün ortalaması alınarak her farklı konsantrasyon için deney sonuçları tablo ve grafik halinde aşağıda gösterilmiştir.

Tablo 4.1: Beyaz pigment konsantrasyonu farklı numuneler - Gözlemler.

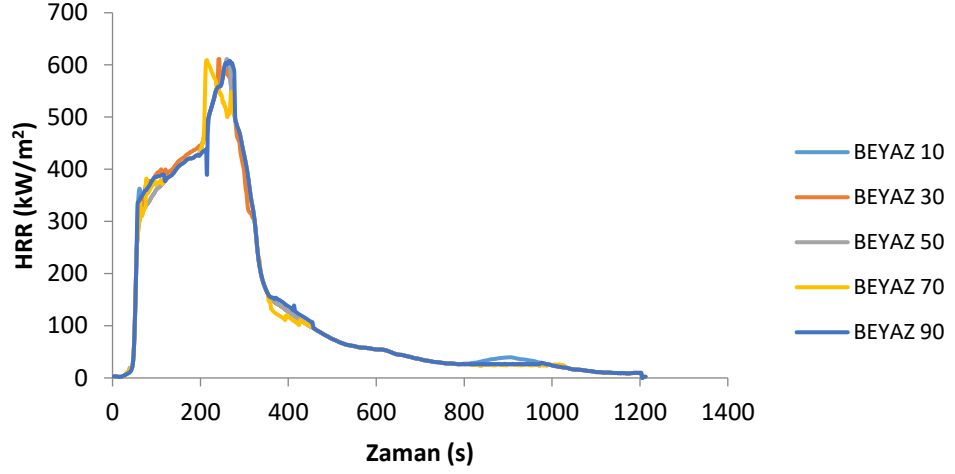
Numune	Tutuşma (s)	Deney süresi (s)	Parlama*	Erime	Kabarma	Karbonlaşma
Beyaz 10	54	1202	Evet	Evet	Hayır	Hayır
Beyaz 30	49	1201	Evet	Evet	Hayır	Hayır
Beyaz 50	46	1206	Evet	Evet	Hayır	Hayır
Beyaz 70	49	1200	Evet	Evet	Hayır	Hayır
Beyaz 90	50	1202	Evet	Evet	Hayır	Hayır

\*Kısa aralıklarla yüzeysel olarak yanıp sönmelidir.

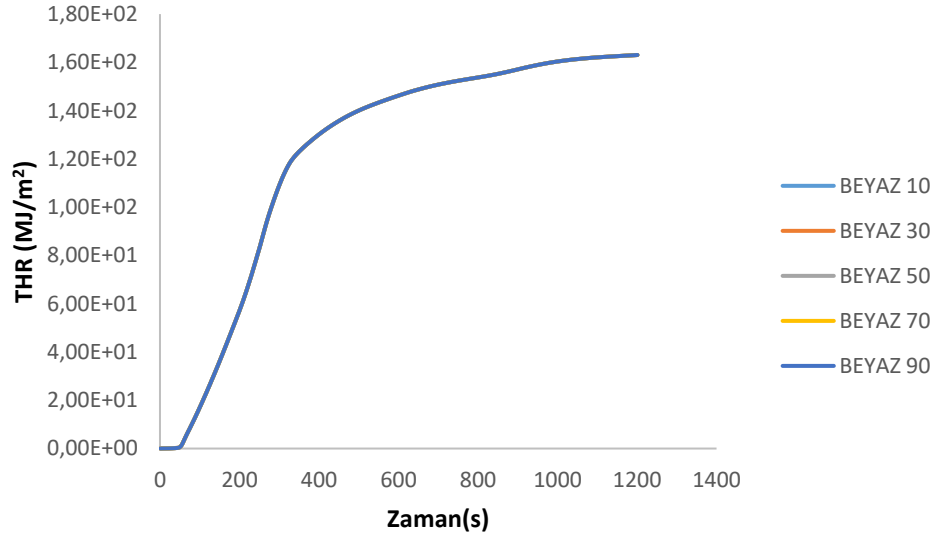
Tablo 4.2: Beyaz pigment konsantrasyonu farklı numuneler – Isı salım ölçümleri.

Numune	Ortalama RHR (ısı salım hızı, kW/m <sup>2</sup> )			En Yüksek RHR (kW/m <sup>2</sup> )	En yüksek RHR Gözlenme zamanı (s)	Toplam ısı salımı (THR, MJ/m <sup>2</sup> )	En yüksek AHRE (kW/m <sup>2</sup> )
	Deney sonu	Tutuşmadan 180 s sonra	Tutuşmadan 300 s sonra				
Beyaz 10	9,76	270,01	363,37	604,35	378	163,10	364,45
Beyaz 30	9,88	281,14	384,52	618,33	352	165,28	367,11
Beyaz 50	9,82	276,74	390,46	611,16	318	158,03	361,22
Beyaz 70	9,63	285,52	391,04	609,26	289	162,34	365,71
Beyaz 90	9,25	289,74	386,65	607,59	321	159,62	360,88

\*Kısa aralıklarla yüzeysel olarak yanıp sönmelidir.



Şekil 4.1: Beyaz pigment konsantrasyonu farklı numunelerin ortalama ısı salım hızı ( $HRR_{av}$ ) grafiği.



Şekil 4.2: Beyaz pigment konsantrasyonu farklı numunelerin toplam ısı salımı (THR) grafiği.

Şekil 4.1 ve 4.2'deki sonuçlara bakıldığında beyaz numuneler arasında gözle görülür bir fark bulunmamakla birlikte pik değerler ve grafiğin düzgün seyirinden kaymaları açısından % 50 konsantrasyona sahip beyaz numune daha düzgün bir eğilim sergilemiştir. Tüm konsantrasyonların ortalama değerlerine bakıldığında ise yine ortalamaya en yakın değerleri % 50 konsantrasyondaki beyaz numune sağlamaktadır. Özellikle toplam ısı salımı tüm numunelerde aynı değeri vermiş, ufak sapmalar gösteren ortalama ısı salım hızı daha belirleyici olmuştur. % 50 konsantrasyon daha

kararlı bir eğilimde yanma davranışı göstermiş ve bu sebeple diğer pigmentler için de % 50 konsantrasyon üzerinden testlerin devamına karar verilmiştir.

Tablo 4.3: Pigment farklı numuneler - Gözlemler.

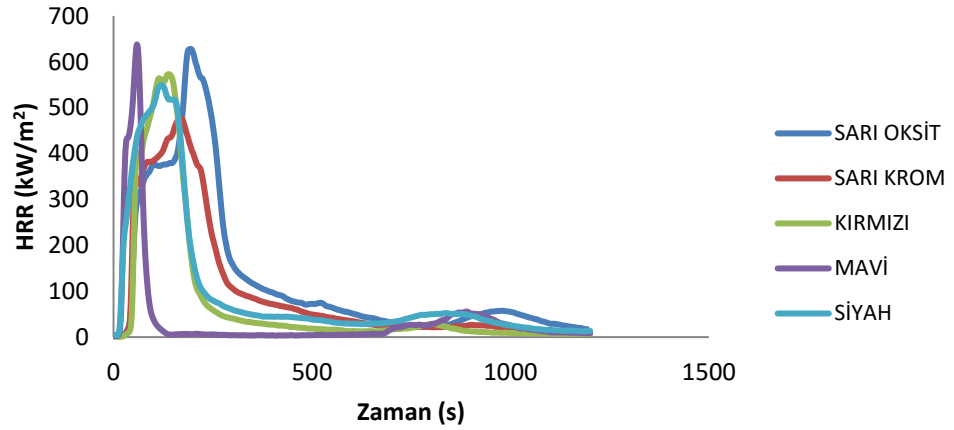
Numune	Tutuşma (s)	Deney süresi (s)	Parlama*	Erime	Kabarma	Karbonlaşma
Sarı krom	48	1204	Evet	Hayır	Evet	Evet
Sarı oksit	24	1204	Evet	Hayır	Evet	Hayır
Kırmızı	51	1204	Evet	Hayır	Evet	Evet
Mavi	25	1200	Evet	Hayır	Evet	Evet
Siyah	21	1202	Evet	Hayır	Evet	Hayır

\*Kısa aralıklarla yüzeysel olarak yanıp sönmel.

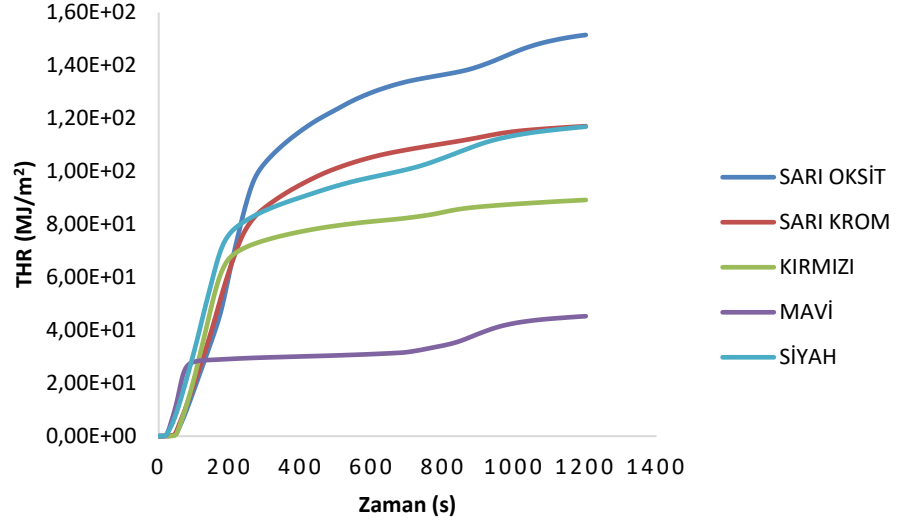
Tablo 4.4: Pigment farklı numuneler – Isı salım ölçümleri.

Numune	Ortalama RHR (ısı salım hızı, kW/m <sup>2</sup> )			En Yüksek RHR (kW/m <sup>2</sup> )	En yüksek RHR Gözlenme zamanı (s)	Toplam ısı salımı (THR, MJ/m <sup>2</sup> )	En yüksek AHRE (kW/m <sup>2</sup> )
	Deney sonu	Tutuşmadan 180 s sonra	Tutuşmadan 300 s sonra				
Sarı krom	8,52	303,69	288,26	478,43	288	117,1	322,24
Sarı oksit	22,16	277,38	344,54	628,03	312	151,90	361,51
Kırmızı	7,02	350,34	246,69	573,10	258	89,40	351,22
Mavi	9,59	161,19	99,01	637,88	178	45,30	341,11
Siyah	13,89	400,29	284,13	549,28	240	117,1	402,72

\*Kısa aralıklarla yüzeysel olarak yanıp sönmel.



Şekil 4.3: Pigment farklı numunelerin ortalama ısı salım hızı (HRR<sub>av</sub>) grafiği.



Şekil 4.4: Pigment farklı numunelerin toplam ısı salımı (THR) grafiği.

Numunelerde kullanılan pigment değiştiğinde farklı renklerin ortaya çıkardığı sonuçlar şekil 4.3 ve 4.4'te verilmiştir. Aynı renkten farklı olarak bu durumda renk koyulaştıkça ısı salım hızı maksimumda aynı kalmakla birlikte daha hızlı pik noktasına ulaşmaktadır. Toplam ısı salımları da yine renk koyulaştıkça artmaktadır. Koyu renklerin radyan ısı kaynağından çıkan ısıyı soğurarak daha çabuk ısındığı ve daha hızlı yandığı, ayrıca soğurulan ısı miktarının renk koyulaştıkça daha az olduğu ortaya çıkmaktadır. Şekil 4.4'te toplam ısı salım hızlarının renge göre nasıl değiştiği açıkça gözlenebilmektedir.

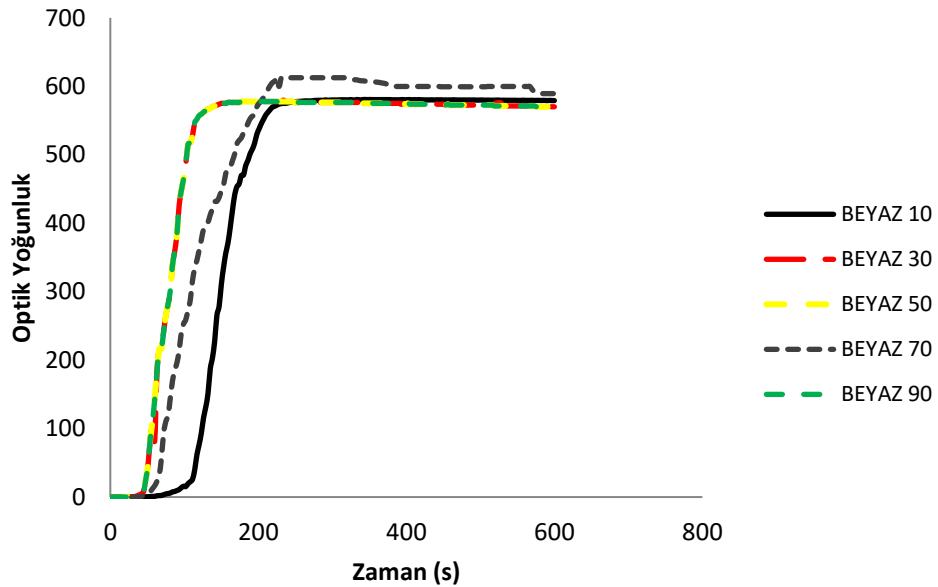
Isı salım hızları açısından bakıldığında beyaz numunelerin hepsi neredeyse birbirinin aynı olan grafikler sergilemiştir. Hem ısı salım hızı hem de toplam ısı salımı açısından tüm numune beyaz numune sonuçları birbirine çok yakın ve benzer eğilimde olup konsantrasyonun ısı salımı üzerinde bir etkisinin olmadığı söylenebilir. Bir diğer açıdan ise tek renk üzerinden deneme yapılabildiği için tüm renklerde pigment konsantrasyonunun bir etkisi kesinlikle yoktur demek bilimsel bir demeç olmayacaktır.

Şekil 4.3'te ise pigment farklı numunelerin sergilediği sonuçlara bakıldığında ise yine toplam ısı salım miktarının değişmemesine rağmen ısı salım hızlarının ve ortaya çıkış zamanlarının değiştiği gözlenmektedir. Isı salım hızları değişen renklere göre çok küçük farklılıklar ortaya koymasına rağmen ısı salım zamanları numunelere göre oldukça yüksek farklılık göstermektedir. Renk koyulaştıkça ısı salımı daha erken bir zamanda meydana gelmektedir. Her ne kadar malzemenin genel yangın davranışını ve

sonuçlarını direk olarak etkilemese de koyu rengin daha çok ve hızlı ışın soğurduğu bilinen bir gerçektir. 1969 yılında Robert F. Supcoe ve Melvin Greenberg isimli Amerikalı deniz subaylarının yaptıkları araştırma sonucu dış kaplama renklerinin açıklık ve koyuluk oranlarına göre ışığı yansıtma özelliklerinin değiştiği ve koyu renklerin absorbanlarının daha yüksek olduğu ve gemi tasarımlarındaki pigment seçimlerinde bu özelliğe dikkat edilmesi gerektiği bir makale ile yayınlanmıştır [41]. Bu deneyde ortaya çıkan sonuç da bu durumu kanıtlar niteliktedir. Ortada bir radyan ısı kaynağı bulunması ve koyu renk numunelerin bu ıyıyı açık renklere göre daha hızlı soğurarak daha çabuk alev almaları, dolayısıyla ısının daha erken saniyelerde kaydedilmesi beklenebilecek bir çıktıdır. Radyasyon alevlenme açısından önemli bir durumdur ve genel olarak yangınlarda normal alevlenme sebebiyle değil daha çok radyan ışınım yoluyla ısınan malzemelerin belli bir noktadan ışınları fazla soğurup ısınması sebebiyle yangın aniden hızla büyümektedir.

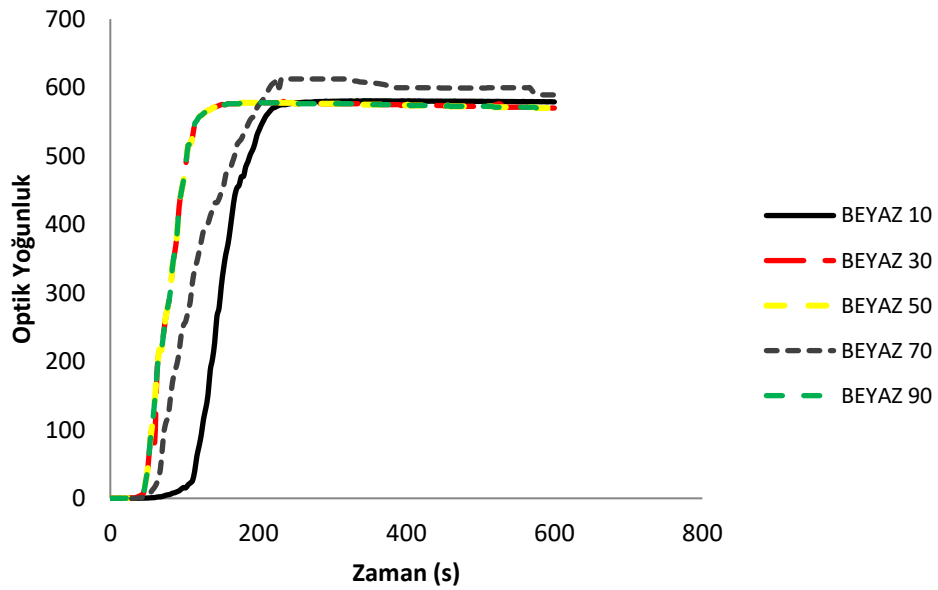
## 4.2. TS ISO 5659-2 Plastikler- Duman oluşumu- Bölüm 2: Tek kabin deneyi ile optik yoğunluğun tayini

Dumandan geçen beyaz ışık huzmesinin zayıflaması ölçülerek sonuçlar spesifik optik yoğunluk açısından grafiklere dökülmüştür.



Şekil 4.5: Beyaz pigment konsantrasyonu farklı beyaz numunelerin karşılaştırması.

Şekil 4.5'te ise pigment farklı numunelerin sergilediği sonuçlara bakıldığında ise yine toplam ısı salım miktarının değişmemesine rağmen ısı salım hızlarının ve ortaya çıkış zamanlarının değiştiği gözlenmektedir. Isı salım hızları değişen renklere göre çok küçük farklılıklar ortaya koymasına rağmen ısı salım zamanları numunelere göre oldukça yüksek farklılık göstermektedir. Renk koyulaştıkça ısı salımı daha erken bir zamanda meydana gelmektedir. Her ne kadar malzemenin genel yangın davranışını ve sonuçlarını direk olarak etkilemese de koyu rengin daha çok ve hızlı ışın soğurduğu bilinen bir gerçektir. 1969 yılında Robert F. Supcoe ve Melvin Greenberg isimli Amerikalı deniz subaylarının yaptıkları araştırma sonucu dış kaplama renklerinin açıklık ve koyuluk oranlarına göre ışığı yansıtma özelliklerinin değiştiği ve koyu renklerin absorbanlarının daha yüksek olduğu ve gemi tasarımlarındaki pigment seçimlerinde bu özelliğe dikkat edilmesi gerektiği bir makale ile yayınlanmıştır [41]. Bu deneyde ortaya çıkan sonuç da bu durumu kanıtlar niteliktedir. Ortada bir radyan ısı kaynağı bulunması ve koyu renk numunelerin bu ısıyı açık renklere göre daha hızlı soğurarak daha çabuk alev almaları, dolayısıyla ısının daha erken saniyelerde kaydedilmesi beklenebilecek bir çıktıdır. Radyasyon alevlenme açısından önemli bir durumdur ve genel olarak yangınlarda normal alevlenme sebebiyle değil daha çok radyan ışınlam yoluyla ısınan malzemelerin belli bir noktadan ışınları fazla soğurup ısınması sebebiyle yangın aniden hızla büyümektedir.



Şekil 4.6: Pigment farklı renkli numunelerin duman yoğunluğu karşılaştırması.

Beyaz numunelerin farklı konsantrasyonlarından elde edilen sonuçlarda spesifik optik yoğunluk ve beyaz ışık geçirim yüzdesinin tüm konsantrasyonlarda birbirine çok benzer değerler olduğu görülmüştür. Tüm konsantrasyonlarda grafik aynı eğilimde kalmıştır. Bir önceki konik kalorimetre sonuçlarından yola çıkarak duman testlerinde farklı renk pigmentlerinin testleri için tüm sonuçların karşılaştırılabilmesinde homojenlik sağlaması açısından yine % 50 konsantrasyondaki numuneler ile devam edilmiştir. Çıkan sonuçlar spesifik optik yoğunluk ve beyaz ışık geçirim yüzdesi açısından grafiklere dökülmüştür. Aynı durum yine radyan ısı kaynağı ile test edilen duman yoğunluğu sonuçlarında da benzer çıkmıştır. Konsantrasyon farkından etkilenmeyen duman yoğunluğu şekil 4.5'te görülebileceği üzere tüm beyaz numunelerde aynı eğilimde çıkarken renkli numunelerde gözle görülür derecedeki fark şekil 4.6'da incelenebilmektedir. Koyu renkli numuneler daha düzgün bir trendle sürekli olarak duman çıkartırken açık renkli numuneler birden bu duman yoğunluğuna ulaşmıştır. Isı absorbe etme kaplama içinde küçük ve sürekli ısıl parçalanmalara dolayısıyla sürekli duman çıkışına sebep olmuş ve alev alan numune daha geç ve az duman çıkardığından bu test de bir önceki durumu kanıtlar nitelikte sonuç vermiştir.

### 4.3. FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) Analizi

Duman kabini içinden belirli zamanlarda örnek çekilerek elde edilen sonuçlar her bir numune için ayrı ayrı tablo 4.5'te verilmiş ve zehirli gaz bakımından renklere göre farklılık sergilediği gözlenmiştir.

Tablo 4.5: Tüm numune tipleri için zehirli gaz değerleri.

Numune	Maksimum Duman Yoğunluğu	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (ppm)	NO (ppm)	NO <sub>2</sub> (ppm)	SO <sub>2</sub> (ppm)	HCl (ppm)	HF (ppm)	HCN (ppm)	HBr (ppm)
<b>Beyaz 10</b>	580,67	2531,91	4,35	277,29	18,06	0,00	1,83	0,16	90,94	2,39
<b>Beyaz 30</b>	575,97	2522,61	4,54	289,14	17,23	0,00	1,79	0,11	88,56	2,57
<b>Beyaz 50</b>	577,73	2488,50	4,44	279,58	17,92	0,00	1,81	0,11	88,02	2,49
<b>Beyaz 70</b>	612,53	2425,13	4,39	275,61	18,46	0,00	1,75	0,15	85,37	2,55
<b>Beyaz 90</b>	578,11	2435,77	4,52	278,33	17,58	0,00	1,83	0,12	84,17	2,64

Tablo 4.5: Devam.

<b>Sarı Krom</b>	554,21	2035,32	4,55	157,57	89,96	0,00	3,54	0,00	57,44	1,69
<b>Sarı Oksit</b>	556,62	2548,88	2,73	173,43	159,21	0,00	2,88	0,00	81,57	2,17
<b>Kırmızı</b>	549,19	246,84	0,52	0,00	126,71	11,43	5,08	0,00	4,66	2,64
<b>Mavi</b>	526,08	237,71	0,00	0,00	194,79	11,82	3,14	0,00	5,72	0,84
<b>Siyah</b>	553,23	1732,94	1,75	124,18	143,50	1,14	3,73	0,00	52,51	3,75

#### 4.4. TS ISO 5658-2 Yangın deneylerine karşı tepkime - Alev yayılması - Bölüm 2: Düşey olarak yerleştirilen yapı ürünlerinde yana doğru yayılma

Farklı konsantrasyon ve pigmentlerle hazırlanıp test edilen numunelerin yanılma alev yayılması sonuçları Tablo 4.6 ve 4.7’de verilmiştir.

Tablo 4.6: Pigment konsantrasyonu farklı numuneler için CFE ve Qsb değerleri.

<b>Numune</b>	<b>Beyaz 10</b>		<b>Beyaz 30</b>		<b>Beyaz 50</b>		<b>Beyaz 70</b>		<b>Beyaz 90</b>	
<b>Test Süresi (sn)</b>	1800		1800		1800		1800		1800	
<b>Tutuşma zamanı (sn)</b>	21		24		23		19		24	
<b>Mesafe (mm)</b>	<b>Beyaz 10</b>		<b>Beyaz 30</b>		<b>Beyaz 50</b>		<b>Beyaz 70</b>		<b>Beyaz 90</b>	
	<b>Zaman (s)</b>	<b>Qsb [kJ/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Zaman (s)</b>	<b>Qsb [kJ/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Zaman (s)</b>	<b>Qsb [kJ/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Zaman (s)</b>	<b>Qsb [kJ/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Zaman (s)</b>	<b>Qsb [kJ/m<sup>2</sup>]</b>
<b>50</b>	27	1371	31	1366	30	1384	28	1362	32	1381
<b>100</b>	39	1961	40	1995	39	1895	38	1942	44	2007
<b>150</b>	45	2182	48	2228	42	2200	47	2165	50	2237
<b>200</b>	57	2532	58	2576	59	2499	60	2493	64	2604
<b>250</b>	69	2644	72	2691	70	2615	71	2587	72	2698
<b>300</b>	84	2601	90	2732	87	2712	81	2642	89	2772
<b>350</b>	162	3869	155	3911	168	3873	157	3885	171	3854
<b>400</b>	237	4345	246	4387	258	4510	237	4302	262	4211
<b>450</b>	375	5181	373	5234	361	5228	384	5174	383	5203
<b>500</b>	510	5791	531	5845	498	5834	501	5830	524	5819
<b>550</b>	849	5341	837	5206	855	5204	823	5294	853	5259
<b>600</b>	1200	5080	1200	5007	1200	4976	1200	5007	1200	4981
<b>650</b>	1647	0	1703	0	1613	0	1655	0	1685	0
<b>700</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>750</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>800</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>850</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Ortalama</b>	(-)	3574	(-)	3598	(-)	3,577	(-)	3556	(-)	3585

(-) Uygulanabilir değil.

Kriter	Beyaz 10	Beyaz 30	Beyaz 50	Beyaz 70	Beyaz 90	Ortalama
$CFE_{ort}$ (Kw/m <sup>2</sup> )	2,85	2,87	2,85	2,88	2,87	2,86
$Qsb_{ort}$ [MJ/m <sup>2</sup> ]	5,08	4,98	5,11	5,05	5,02	5,05

Aynı pigmentin konsantrasyonu değiştiğinde ortaya çıkan zehirli gazların çeşidi ve miktarları değişmemektedir.

Tablo 4.7: Pigment farklı numuneler için CFE ve Qsb değerleri.

Numune	Sarı oksit	Sarı krom	Kırmızı	Mavi	Siyah
Test Süresi (s)	1800	1800	1800	1800	1800
Tutuşma zamanı (s)	29	28	25	27	25

Mesafe (mm)	Sarı oksit		Sarı krom		Kırmızı		Mavi		Siyah	
	Zaman (s)	Qsb [kJ/m <sup>2</sup> ]	Zaman (s)	Qsb [kJ/m <sup>2</sup> ]	Zaman (s)	Qsb [kJ/m <sup>2</sup> ]	Zaman (s)	Qsb [kJ/m <sup>2</sup> ]	Zaman (s)	Qsb [kJ/m <sup>2</sup> ]
50	46	2133	44	2084	31	1769	30	2062	29	1811
100	51	2413	53	2344	37	1904	39	2241	41	2095
150	58	2764	62	2700	45	2225	48	2356	53	2324
200	69	3065	72	2967	62	2512	63	2638	62	2640
250	84	3219	87	3127	79	2733	77	2778	75	3089
300	120	3717	114	3691	92	2762	85	3046	92	3245
350	156	3726	149	3803	144	2937	169	3125	151	3854
400	201	3685	205	3787	198	4100	240	3203	232	4111
450	414	4719	399	4604	336	4271	400	4007	328	4308
500	582	5795	556	5430	481	5530	556	5303	494	5592
550	855	5404	824	5578	703	5694	895	5487	877	5422
600	1200	5060	1200	5123	1200	5521	1200	5556	1200	5064
650	1326	0	1338	0	1355	0	1301	0	1254	0
700	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
750	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
800	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
850	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ortalama	(-)	3808	(-)	3769	(-)	3497	(-)	3484	(-)	3630

(-) Uygulanabilir değil.

Kriter	Sarı oksit	Sarı krom	Kırmızı	Mavi	Siyah	Ortalama
$CFE_{ort}$ (Kw/m <sup>2</sup> )	6,29	5,87	6,02	6,11	5,83	6,02
$Qsb_{ort}$ [MJ/m <sup>2</sup> ]	5,79	5,63	5,41	5,75	5,14	5,54

Tüm deneylerde tutuşma ile alev ilerlemesi gözlenmiş ve deney süresi 30 dakika sürmüştür. 20 dakika sonrasında alev ilerlemesi durmuş ve sönme gerçekleşmiştir. Tüm numunelerde birbirine benzer alev ilerleme eğilimi görülmüş, 650 mm çizgisine

kadar ilerleme devam etmiş ve bu noktada genellikle sönme gözlenmiştir. Söndürmedeki kritik ısı akıları ve sürdürülebilir yanma ısıları birbirine yakın değerler çıkmıştır.

#### 4.5. TS EN ISO 1716 Yapı ürünlerinin yangına tepki deneyleri - Yanma ısısının tayini (kalorifik değer)

Gerçekleştirilen 3 ölçüm sonucunun ortalaması her numune için tablo 4.8'de verilmiştir.

Tablo 4.8: Tüm numuneler için brüt yanma ısısı değerleri.

Numune	Brüt Yanma Isısı, MJ/kg
Beyaz 10	16,8
Beyaz 30	16,3
Beyaz 50	16,7
Beyaz 70	16,0
Beyaz 90	16,0
Sarı Oksit	17,3
Sarı Krom	16,9
Kırmızı	17,7
Mavi	15,3
Siyah	17,5

Brüt yanma ısısı da yine birbirinin neredeyse aynısı olarak sonuçlanan testlerdir. Eğer yapısal anlamda pigmentler malzemenin içindeki diğer bileşenlerle birlikte yanma reaksiyonuna katılarak ortama ısı verip yangın yüküne katkıda bulunmuş olsaydı, brüt yanma ısısı sonuçlarında farklılık olarak ortaya çıkabilme varsayımı çok yanlış olmayacaktır.

## 4.6. TS EN ISO 4589-2 Plâstikler- Oksijen indisi ile yanma özelliklerinin tayini- Bölüm 2: Ortam sıcaklığı tayini

Tüm deneyler tamamlanmış ve münferit deney sonuçları tablo 4.9’da verilmiştir. Genel zehirli gaz ve oksijen indisi sonuçlarında ise tüm numunelerde konsantrasyon ve pigment farkı gözetmeksizin birbirine çok yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 4.9: Tüm numune tipleri için oksijen indisi değerleri.

Numune	Oksijen İndisi, OI
Beyaz 10	20,75
Beyaz 30	21,12
Beyaz 50	20,89
Beyaz 70	20,50
Beyaz 90	20,45
Sarı Oksit	21,32
Sarı Krom	21,85
Kırmızı	20,89
Mavi	21,22
Siyah	20,77

## 4.7. Yüzey Karakterizasyonu

### 4.7.1. TS EN ISO 868 - Plastikler ve ebonit- Batma sertliğinin durometre ile tayini (Shore sertliği)

Gerçekleştirilen ölçüm sonuçları aşağıdaki tablo 4.10’da gösterilmiştir.

Tablo 4.10: Tüm numune tipleri için sertlik değerleri.

Numune	Sertlik, Shore D
Beyaz 10	D/15:46
Beyaz 30	D/15:40
Beyaz 50	D/15:35
Beyaz 70	D/15:22 ile D/15:29
Beyaz 90	D/15:- (A/15:11)
Sarı Oksit	D/15:35
Sarı Krom	D/15:38
Kırmızı	D/15:35
Mavi	D/15:39
Siyah	D/15:34

Yazılı gösterimde ilk başta yazılan 15 saniye cinsinden zamanı, sonda yazılan sayı ile batma derinliğini gösterir. Standart yöntemine göre Shore A üzerinden yapılan ölçümlerde 90 üzeri çıkan malzemelerde ölçüm için Shore D'ye geçilir. Shore D'de 20 altında çıkan ölçümlerde ise Shore A'ya geçilir. Bu çalışmada farklı pigmentlerle hazırlanan numunelerle beyaz pigmentin ilk üç konsantrasyonunda Shore D ile sonuç alınabilmiş olmasına rağmen Beyaz 90 kodlu numunede iğne ucu 15 saniye içinde numunenin içine tamamen battığı için ölçüm alınamamıştır. Bu durumda normal şartlarda Shore A ile ölçüm yapılması gerekirken diğer numunelerle karşılaştırma olabilmesi için Shore A ile ölçüm yapılmamıştır. Beyaz 70 kodlu numune ise farklı numune alanlarında değişen sonuçlar vermiştir. Yer yer numune yüzeyinde yumuşaklıklar göstermektedir. Bu sebeple sonuç aralığı 22 ile 29 arasında değişen sayılar çıkmıştır. Beyaz 90 kodlu numunede yüzey yumuşaklığı çıplak elle bile hissedilebilmektedir ancak Beyaz 70 kodlu numunede bu anlaşılammamaktadır. Diğer numuneler ise daha sert ve kırılğan yüzey yapısına sahiptir.

#### 4.7.2. Hunter-Lab Renk Tayini

Pigment konsantrasyonu farklı beyaz numuneler ile farklı pigmentlerle hazırlanmış renkli numunelerin L\*a\*b sonuçları referans RAL renk kodlarıyla birlikte aşağıdaki tablo 4.11'de belirtilmiştir.


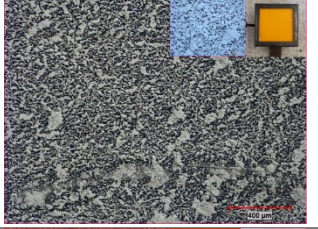
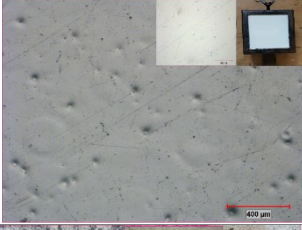




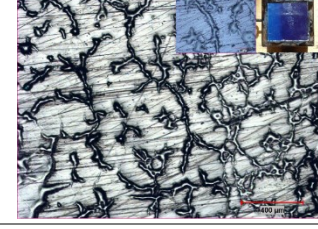
Tablo 4.11: Tüm numune tipleri için referans renklerle L\*a\*b değerleri.

Numune	Referans RAL Kodu	Renk	L değeri	a değeri	b değeri	$\Delta E$ değeri
Beyaz 10	9003	RAL 9003	2	-0,51	3,59	4,14
Beyaz 30	9003		1,89	-0,42	3,51	4,00
Beyaz 50	9003		1,54	-0,41	3,37	3,73
Beyaz 70	9003		1,51	-0,03	2,42	2,85
Beyaz 90	9003		0,75	0,47	1,19	1,48
Sarı Oksit	1007	RAL 1007	0,59	-0,23	-0,47	0,79
Sarı Krom	1007		0,11	0,08	-0,71	0,73
Kırmızı	3000	RAL 3000	-0,89	-0,23	-1,22	1,53
Mavi	5002	RAL 5002	-1,34	-0,02	-0,81	1,57
Siyah	9011	RAL 9011	0,92	-0,14	0,38	1,01

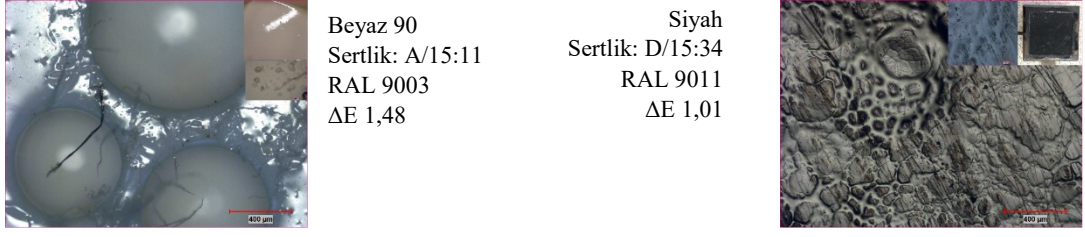
Uluslararası kodlarla belirlenen renk kaymaları epoksi kaplamada yukarıdaki sonuçları vermiştir. Yüzey parlaklığı veya matlığı L değerini etkilerken renk kaymaları daha çok a ve b düzlemlerinde kendini göstermiştir. Bu sonuçlar da malzeme yüzey ve yapısal özellikleri ile ilgili fikir vermekle birlikte deneylerin izlenebilirliği ile alakalı matematiksel sonuç olması açısından önemlidir.

### 4.7.3. Optik Mikroskop İncelemesi

Nikon Eclipse L 150 marka optik mikroskop ile 5x, 10x, 20x ve 50x yakınlığında görüntüler elde edilmiş ve aşağıdaki şekillerde her bir numune için ayrı ayrı incelenmiştir. 5x ile 20x büyütme altında kaydedilen görüntüler şekil 4.7’de paylaşılmıştır.

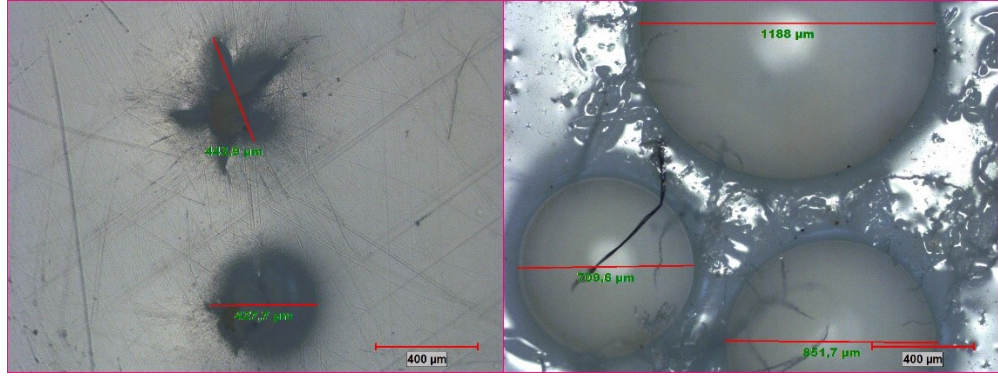
	Beyaz 10 Sertlik: D/15:46 RAL 9003 $\Delta E$ 4,14	Sarı krom Sertlik: D/15:35 RAL 1007 $\Delta E$ 0,79	
	Beyaz 30 Sertlik: D/15:40 RAL 9003 $\Delta E$ 4,00	Sarı oksit Sertlik: D/15:38 RAL 1007 $\Delta E$ 0,73	
	Beyaz 50 Sertlik: D/15:35 RAL 9003 $\Delta E$ 3,73	Kırmızı Sertlik: D/15:35 RAL 3000 $\Delta E$ 1,53	
	Beyaz 70 Sertlik: D/15:22-29 RAL 9003 $\Delta E$ 2,85	Mavi Sertlik: D/15:39 RAL 5002 $\Delta E$ 1,57	

Şekil 4.7: Numunelerin 5x ve 20x büyütme oranlarında optik mikroskop görüntüsü.



Şekil 4.7: Devam.

% 70 konsantrasyonlu Beyaz 70 kodlu numunelerde çıplak gözle farkedilemeyen ancak mikroskopla incelendiğinde anlaşılabilen küçük çatlaklar ve delikler görüntülenmiştir. Aynı durum % 90 konsantrasyonlu Beyaz 90 kodlu numunelerde de mevcuttur ancak % 90'lık numunelerde delikler daha büyük çapta ve numune yüzeyinde de çıplak gözle fark edilebilmektedir.



Şekil 4.8: Beyaz 70 ve Beyaz 90 numunelerde gözenek ölçümleri.

Şekil 4.8'de de görüleceği gibi Beyaz 70 kodlu numunede 400-450 mikron ve Beyaz 90 kodlu numunede 700-1200 mikron boyutlarında konsantrasyon arttıkça büyüyen gözenek ve yırtık şeklinde yapılar gözlenmiştir. Yüzeyi en düzgün ve homojen yapıda olan konsantrasyon % 50 olarak belirlenmiş ve diğer tüm pigment farklı numunelerde de % 50 konsantrasyon esas alınarak uygulama yapılmıştır. Numune yüzeyinde oluşan bu düzensiz yapıların yüksek konsantrasyondaki pigmenti karşılayacak malzeme olmaması ve aglomerasyon ile numune yapısında pigmentlerin kümeleşmesi sonucu homojensizlik olma ihtimali yüksektir. Ivan H. Tsou ve James W. Garner'ın 1973'te yayınladıkları makalede toz boya kullanımında sıvı kısmın hazırlanırken aglomerasyon olmaması için sıvı ve toz kısımların karışma miktarları ve miktarlara bağlı olarak toz boyanın parça boyutunun önemli olduğuna dikkat

çekilmiştir [42]. Özellikle konsantrasyon arttıkça düzensiz yapının boyutlarının da artması bu olasılığı destekler niteliktedir. Ayrıca % 50 konsantrasyonda hazırlanan tüm pigment farklı numuneler birbirine yakın değerler vermiştir.

Pigmentler genel olarak inert katkılar olduğundan yangın yüküne katkı sağlamadığı sonucu çıkmaktadır. Şekil 4.9'da yanma sonrası oluşan küller / yanma artıkları incelendiğinde renk veren pigmentlerin aynen durduğu ve yanmaya katılmadığı açıkça görünmektedir. Beyaz ve sarı renk kül olmasına rağmen halen renk vermeye devam etmiş ve bir bozunmaya uğramamıştır. Tüm numune tiplerinde az veya çok bu durum gözlenebilmektedir.



Şekil 4.9: Beyaz 50 ve sarı oksit numunelerinin yanma artıkları.

Toplam ısı salımı veya ısı salım hızı verileri üzerinden karakterizasyonun mümkün olup olmadığı bu çalışmada ortaya çıkarılamamıştır. Ancak literatürde bu konu üstünde duran ve olumlu sonuçlardan bahseden çalışmalar incelenmiştir [25]. Gelecek çalışmalarda, bu bağlantı üzerinde daha fazla durularak, daha sistematik şekilde malzeme tasarlayıp yanma davranışları belirlenebilir ve sözü edilen farklanmanın olup olmayışının sonuçlar üzerindeki etkileri kantitatif olarak da ortaya konulabilir.

Sonuç olarak, günümüzde polimer teknolojisi, bu malzemeleri hayatın birçok alanında vazgeçilmez bir yere koyacak seviyeye gelmiştir. Yapı malzemeleri ve inşaat sektörü de bu duruma bir istisna teşkil etmemektedir. Ancak geleneksel olarak yanmaya dirençli ya da yangın karşısında gösterdikleri davranış iyi bilinen malzemelerin baskın olduğu bu sektörde polimerlerin önündeki en büyük engel yanıcı malzemeler olmalarıdır. Hali hazırda yapılarda kullanılmakta olan polimer malzemelerin önemli bir çoğunluğu yanıcı doğalarından ötürü büyük riskler ortaya çıkarmaktadır. Bu yangına karşı güvenli yeni polimerlerin üretilmeyeceği ya da halen kullanılanların yangına karşı güçlendirilemeyeceği anlamına gelmez.

Bu amaçla başta epoksiler olmak üzere yapısal ve yapısal olmayan polimerlerin yangına tepki davranışlarının ortaya çıkarılması, kimyasal ve fiziksel yapılarının makro boyutta yanma davranışlarına etkilerinin tahmin edilebilmesi için modelleme çalışmalarının yapılması yeni bir yaklaşım değildir ve son on yılda yeni ilerlemeler kaydedilmiştir [44]. Bu açıdan bakıldığında, bu tez çalışması kapsamında ortaya konan bilgilerin özgün değerinin çok da dikkate değer olmadığı öz eleştirisi yapılabilir. Öte yandan, Türkiye’de, özellikle de lokomotif sektörlerden biri olan inşaat sektöründe yangın güvenliği yeni anlaşılmaya ve araştırılmaya başlanan bir konudur. Bu nedenle de yalnız polimer yapılı malzemelerle sınırlı olmayan ana dilde bir kaynak eksikliği söz konusudur.

Buna paralel olarak, konuyla ilgili yapılan araştırma geliştirme çalışmaları da ya yalnızca akademik düzeyde kalmakta ve sektöre yansımaları en düşük düzeyde olmakta, ya da belli başlı kuruluşların know-how dağarcıklarında paylaşımına açık olmayan bilgiler olarak bulunmaktadır.

## 5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında özetle, polimerlerin ısı parçalanmaları ile ilgili genel bilgilere değinilmiş, polimer yapılı malzemelerin yapı malzemesi olarak kullanımları örneklerle açıklanmış, yangın güvenliğinin yapı malzemeleri açısından önemi ortaya konmuş, epoksi polimerlerin son uygulamada yanma davranışının içine karıştırılan pigmentlerin cins ve miktarlarıyla nasıl değiştiği incelenmiş ve bu konuların bağlantısını kurmak amacıyla bir deneysel çalışma planlanarak gerçekleştirilmiştir.

- Yangın testlerinde aynı ürünün farklı renkleri ile teste tabi tutulacağı ve tüm ürünlerin yangın sınıflandırması yapılacağı durumlarda, her bir renk için ayrı numune hazırlanmakta ve iki tekrar olarak test edilmektedir. Son sınıflandırma raporu tek marka üzerinden tek ürüne de yapılsa portföyde bulunan tüm renklerden en az ikişer numune ile test sonuçlarına bakılmaktadır. Bu hem maliyet hem de zaman kaybı demektir.
- Deneysel çalışma kapsamında epoksi kaplamalar aynı karışımın farklı renk pigmentleriyle ile aynı karışım ve aynı pigmentin farklı konsantrasyonlarıyla hazırlanarak teste tabi tutulmuş ve ne pigment değişimiyle ne de konsantrasyon değişimiyle yangın sınıflandırmasına etki eden farklılıklar olmadığını destekleyen sonuçlar ortaya çıkarılmıştır.
- Numune uygulamaları sonrasında pigment konsantrasyonunun değişmesi numune yüzey yapısını ve malzeme sertlik derecesini önemli biçimde etkilemektedir. Beyaz 10 ve Beyaz 30 kodlu numuneler daha kırılğan yüzeye sahip iken Beyaz 50 normal kaplama yüzey yapısına sahiptir. Beyaz 70 ve Beyaz 90 kodlu numuneler diğerlerine göre daha uzun sürede kürlenmiş ve kurumuştur. Kuruma tamamlanmasına rağmen yüzeyleri yumuşak kalmış, özellikle Beyaz 90 kodlu numunenin yüzeyinde çıplak gözle görülebilen delikler ve pürüzlükler oluşmuş, numune yüzeyi oldukça yapışkan kalmıştır.
- Konsantrasyon farkından etkilenmeyen duman yoğunluğu tüm beyaz numunelerde aynı eğilimde çıkarken renkli numunelerde dikkate değer fark gözlenmiştir. Koyu renkli numuneler daha düzgün bir trendle sürekli olarak duman çıkartırken açık renkli numuneler birden bu duman yoğunluğuna ulaşmıştır. Isı absorbe etme kaplama içinde küçük ve sürekli ısı parçalanmalara

dolayısıyla sürekli duman çıkışına sebep olmuş ve alev alan numune daha geç ve az duman çıkardığından bu test de bir önceki durumu kanıtlar nitelikte sonuç vermiştir.

- Organik bileşenleri olan pigmentlerin yanma davranışları daha sürekli yapıda olmuştur. Birden yanıp birden sönmek yerine daha sürekli alev çıkararak daha uzun ve yavaş bir şekilde yanma eğiliminde oldukları gözlenmiştir.
- Çalışma içinde sunulan özet teorik bilgiler yüzeysel, ancak kapsamlı bir derleme oluşturmaktadır. Bu yönleriyle konuyla ilgili yeni uzmanların yetişmesi, hali hazırda sektörde çalışmakta olanların bilgilendirilmesi amacıyla hazırlanacak eğitim notlarına ciddi katkı olabilecekleri düşünülmektedir. Ayrıca sektörde test yaptırarak raporlama ihtiyacı olan kurum ve kuruluşlara zaman kazancı ve maliyet düşüşü sağlaması kaçınılmazdır.

TSE hali hazırda, üyesi bulunduğu uluslararası standardizasyon faaliyetlerini yakından takip etmekte ve fikir paylaşımı ile kabul süreçlerinde aktif rol oynamaktadır. Yangın güvenliği sektöründe, özellikle üniversitelerimiz, ülke içinde öncü durumda olsa da uluslararası alanda gelişmeleri geriden takip etmek durumunda kalmaktadır. Standardizasyon süreçleri fazla hantal olmaları sebebiyle tek başına enstitülerin faaliyetleriyle yön verilecek bir süreç değil ancak akademik faaliyetlere ve yaratıcı projelere bütçe ve zaman kaynağı ayrılırsa faydalanılabilecek bir fırsattır.

## KAYNAKLAR

- [1] Brandrup J., Immergut E. H., Grulke, E. A., (1999), "Polymer Handbook", 4th Edition, New York Wiley.
- [2] Web 1, (2015), <http://www.plasticseurope.org/documents/document/2015.pdf>, (Erişim Tarihi: 15/08/2018).
- [3] Akovalı G., (2007), "Polymers in Construction", Rapra Technology Limited, (13-22).
- [4] Web 2, (2012), <http://www.hurriyet.com.tr/polat-towerda-buyuk-yangin-210015>, (Erişim Tarihi: 03/09/2018).
- [5] Web 3, (2012), <http://www.haberturk.com/gundem/haber/764465-polat-tower/>, (Erişim Tarihi: 03/09/2018).
- [6] Rasbash D. , Ramachandran G., Kandola B., (2004), "The Fire Safety System. Evaluation of Fire Safety", West Sussex: Wiley.
- [7] Lyon R. E., Janssens M. L., (2005), "Polymer Flammability. Washington DC: US Department of Transportation Federal Aviation Administration".
- [8] Coleman M. M., Painter P. C., (1998), "The Nature of Polymeric Materials. Fundamentals of Polymer Science: An Introductory Text", 2nd Edition, Boca Raton: CRC Press.
- [9] Saçak M., (1998), "Polimer Kimyasına Giriş", Ankara Üniversitesi Döner Sermaye İşletmesi Yayınları.
- [10] Chandra S., Ohama Y., (1994), "Natural Polymers. Polymers in Concrete" Boca Raton: CRC Press.
- [11] Reality A, Cosenza E., Manfredi G., Nanni A., (2001), "Composites in Construction", ASCE Publications, Reston, VA, USA.
- [12] Seymour R.B., (1989), "Seymour in Pioneers in Polymer Science", Kluwer Academic Publishers, Dodrecht, TheNetherlands, (80-81).
- [13] Fische H., (2002), "Dependable Computing", Proceedings of Eurochem Conference, 31-32, Toulouse, France, 23-25 October.
- [14] Web 4, (2008), <http://www.plasticseurope.org/information-centre/news/news-2008/europes-first-plastic-bridge-is-open.aspx>, (Erişim Tarihi: 07/09/2018).
- [15] Web 5, (2010), <https://www.iabse.org/Images/Outstanding%20Structure%.pdf>, (Erişim Tarihi: 07/09/2018).

- [16] Pham Ha Q., Marks M. J., (2005), "Epoxy Resins Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry".
- [17] MEB, (2012), "Kimya Teknolojisi Reçineler", Ankara, T.C. Milli Eğitim Bakanlığı.
- [18] Beyler C. L., Hirschler M. M., (2000), "Thermal Decomposition of Polymers. Fire Retardancy of Polymeric Materials", Marcel Dekker.
- [19] Wilczura-Walchnik H., "Combustion and Thermal Degredation of Polymers" Uniwersytet Warszawski Chemii, (4-6).
- [20] Mouritz A. P., Gibson A. J., (2006), "Introduction. Fire Properties of Polymer Composite Materials", Dordrecht: Springer.
- [21] Web 6, (2007) <https://www.flickr.com/photos/mitopencourseware/3328242539> (Erişim Tarihi: 18.11.2018).
- [22] Wang R., Zheng Y., (2011), "Polymer Matrix Composites and Technology".
- [23] Levchik S.V., Weil E.D., (2004), "Thermal decomposition, combustion and flame-retardancy of epoxy resins", (7-15).
- [24] Brydson J.A., (1995), "Plastic Materials", 3rd Edition, Butterworth-Heinemann.
- [25] Ellis, B., (1993), "Chemistry and Technology of Epoxy Resins", Chapman & Hall, Newyork, (67-75).
- [26] Talbert R., (2008), "Paint Technology Handbook", 4th Edition, CRC Press.
- [27] Yürekli Ş., (1995), "Reçine ve Boya Teknolojisi", Marshall Yayınları, (4-8).
- [28] Web 8, (2016), <http://www.nfpa.org/news-and-research/news-and-media/press-room/>, (Erişim Tarihi: 13.09.2018).
- [29] Hartin E., (2008), "Fire Development and Fire Behavior Indicators. Compartment Fire Behavior Training", (13).
- [30] Web 9, (2013), NIST, [http://www.nist.gov/fire/fire\\_behavior.cfm](http://www.nist.gov/fire/fire_behavior.cfm), (Erişim Tarihi: 13.09.2018).
- [31] TS EN 13501-1+A1, (2010), İnşaat ürünlerinin ve yapı elemanlarının yangınla ilgili sınıflandırılması-Bölüm 1: Yangına tepki deneyleri verilerinin kullanılması ile sınıflandırma. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.
- [32] T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, (2015), Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik.

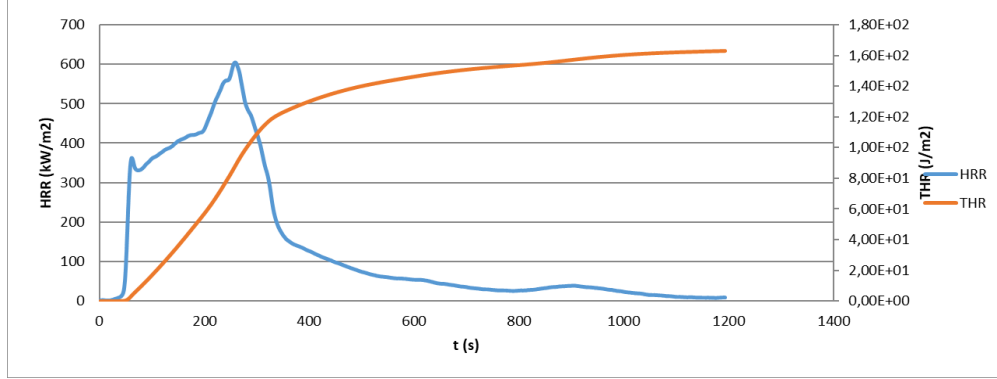
- [33] TS EN 45545-2+A1, (2016), Demiryolu uygulamaları - Demiryolu araçlarda yangından korunma - Bölüm 2: Malzeme ve bileşenlerinin yangın davranışları için gereksinimler. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.
- [34] Drysdale D., (1998), “Encyclopaedia of Occupational Health and Safety 4th Edition”, Chapter 41 – Fire.
- [35] Babrauskas V., Peacock, R. D., (1992), “Heat Release Rate: Single Most Important Variable in Fire Hazard”, Fire Safety Journal, 18.
- [36] ISO 19702 / 2006 - Toxicity testing of fire effluents - Guidance for analysis of gases and vapours in fire effluents using FTIR gas analysis.
- [37] Railway applications, (2013), “Fire protection on railway vehicles - Part 2: Requirements for fire behaviour of materials and components”.
- [38] TS EN ISO 1716, (2018), “Yapı ürünlerinin yangına tepki deneyleri, Yanma ısısının tayini (kalorifik değer)”, Türk Standardları Enstitüsü.
- [39] TS EN ISO 4589-2/A1, (2016), “Plâstikler- Oksijen indisi ile yanma özelliklerinin tayini- Bölüm 2: Ortam sıcaklığı tayini”, Türk Standardları Enstitüsü.
- [40] Speirs H., (2003), “Introduction to Prepress”, BPIF, Pira International, UK, (12).
- [41] TS ISO 5660-1, (2015), “Yangına tepki deneyleri - Isı salınımı, duman oluşumu ve kütle kaybı hızı - Bölüm 1: Isı salınım hızı (konik kalori ölçer yöntemi)”, Türk Standardları Enstitüsü, (21-32).
- [42] Ivan H. T., James W. G., (1973), “Method of Making Powder Paint”, Grow Chemical Corp., Newyork, (17).
- [43] Supcoe R. F., Greenberg M., (1969), “Dark Coating with Solar Infrared Absorbing Properties”, USA Secretary of Navy, Washington D.C.
- [44] Hongzhou L., (2012), “Integrated thermal, micro- and macro-mechanical modelling of post-fire flexural behaviour of flame-retarded glass/epoxy composites”, Computational Materials Science.

## ÖZGEÇMİŞ

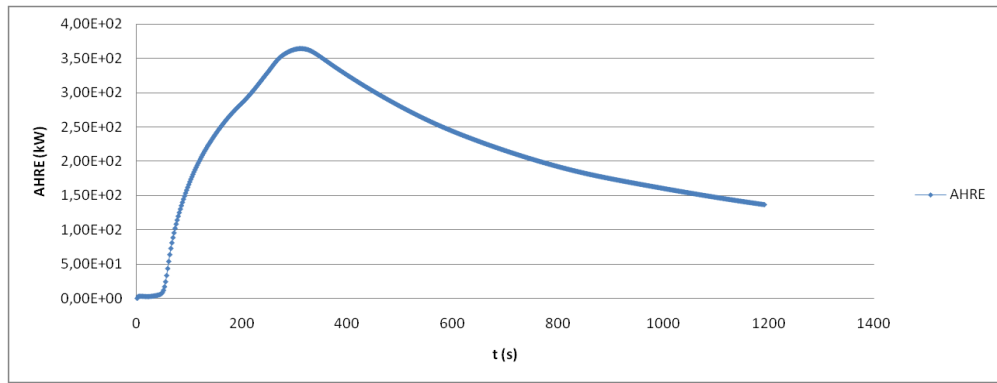
Ceren Kezban GÜL 1986'da İstanbul'da doğdu. Lise öğrenimini 1997-2005 yılları arasında Galatasaray Lisesi'nde, lisans öğrenimini 2006-2011 yılları arasında Orta Doğu Teknik Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü'nde tamamladı. 2011 yılında otomotiv arge mühendisliğinde 3 aylık bir deneyimden sonra 2013 yılına kadar Enerjisa Doğalgaz Uzmanı olarak çalıştı. 2013 yılından itibaren Türk Standardları Enstitüsü Yapı Malzemeleri Yangın ve Akustik Laboratuvar Müdürlüğü'nde çalışmaya devam etmektedir. 2015 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nde (sonradan Gebze Teknik Üniversitesi olarak değişmiştir.) Fen Bilimleri Enstitüsü Malzeme Bilimi ve Mühendisliği anabilim dalında yüksek lisans öğrenimine başladı. İlgi ve çalışma alanları yapı malzemeleri özelinde polimer malzemelerin yalıtımsal ve yangına tepki özellikleridir.

# EKLER

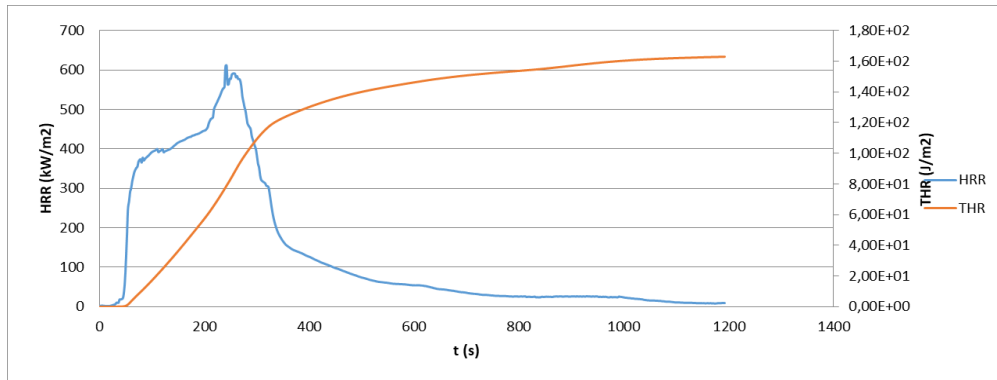
## Ek A: Grafikler



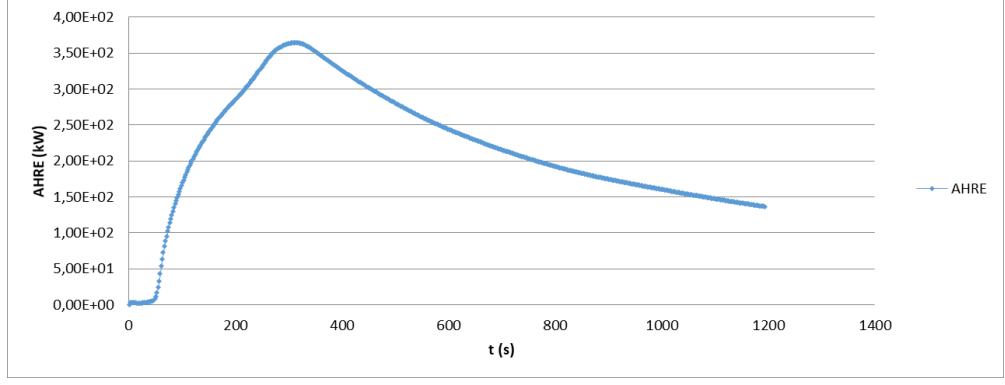
Şekil A.1.1. Beyaz 10 ortalama ısı salım hızı (HRR<sub>av</sub>) ve toplam ısı salımı (THR) grafikleri



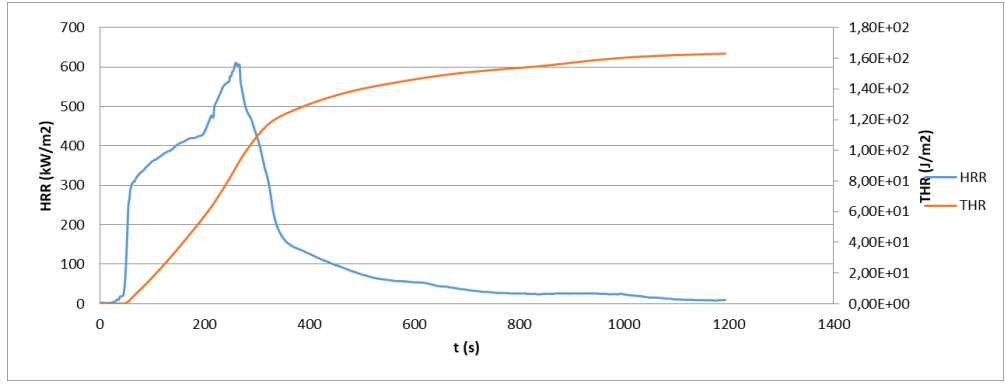
Şekil A.1.2. Beyaz 10 ortalama ısı salım hızı (AHRE) grafiği



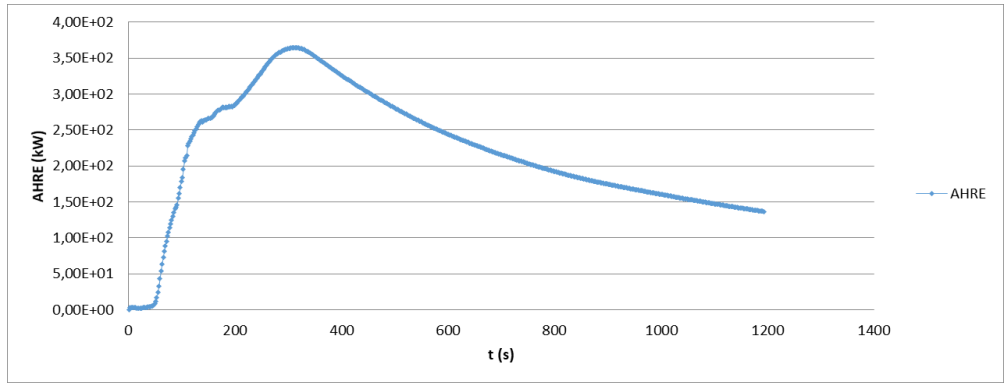
Şekil A.1.3. Beyaz 30 ortalama ısı salım hızı (HRR<sub>av</sub>) ve toplam ısı salımı (THR) grafikleri



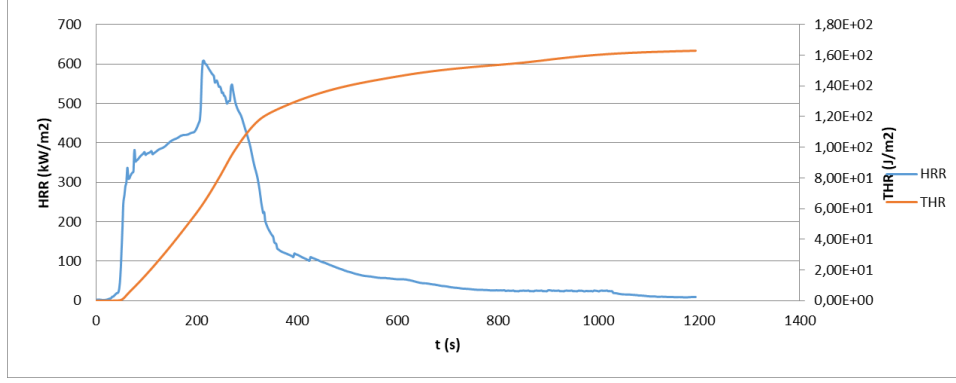
Şekil A.1.4. Beyaz 30 ortalama ısı salım hızı (AHRE) grafiği



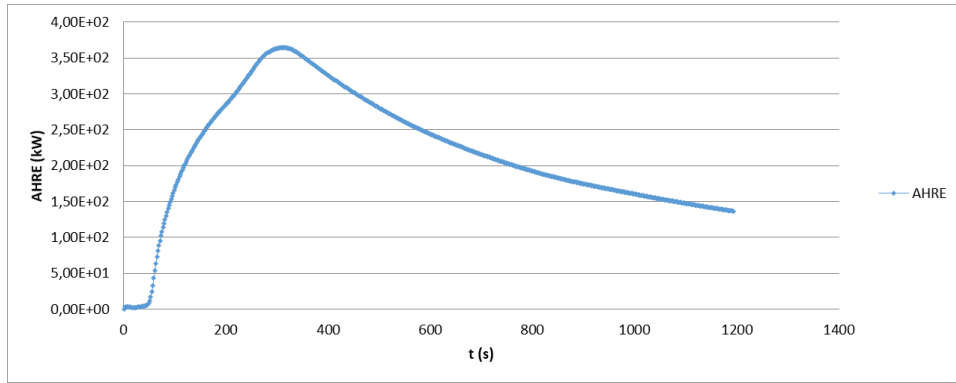
Şekil A.1.5. Beyaz 50 ortalama ısı salım hızı (HRRav) ve toplam ısı salımı (THR) grafikleri



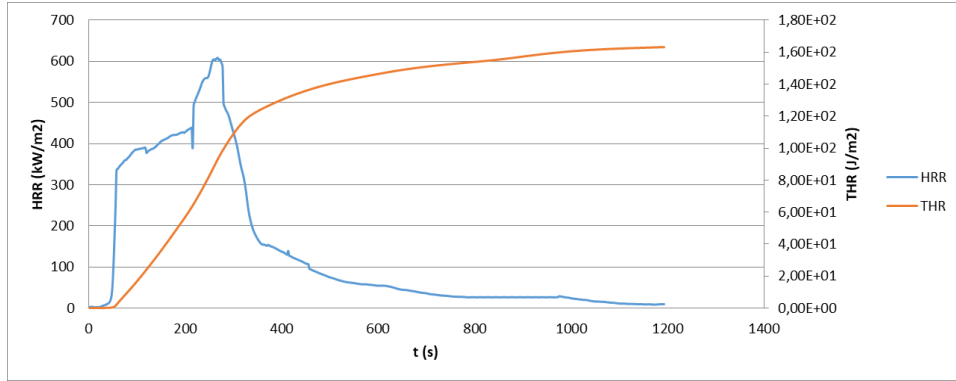
Şekil A.1.6. Beyaz 50 ortalama ısı salım hızı (AHRE) grafiği



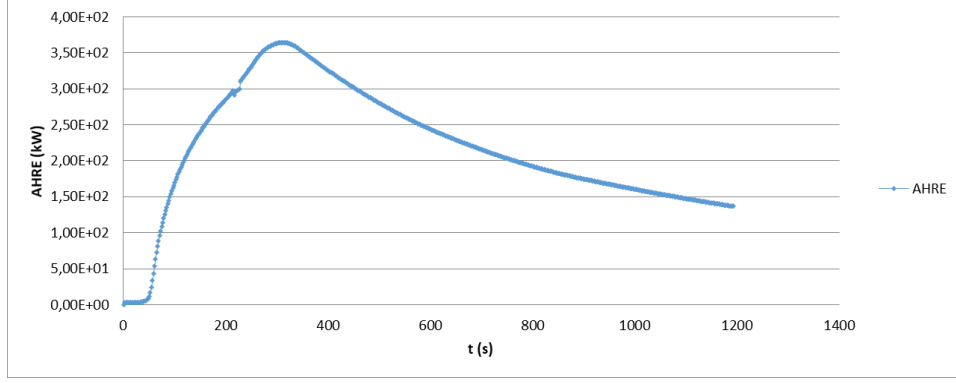
Şekil A.1.7. Beyaz 70 ortalama ısı salım hızı (HRRav) ve toplam ısı salımı (THR) grafikleri



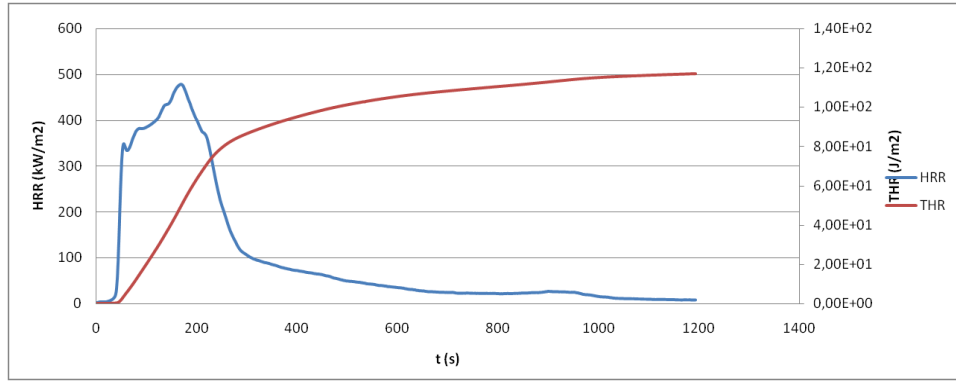
Şekil A.1.8. Beyaz 70 ortalama ısı salım hızı (AHRE) grafiği



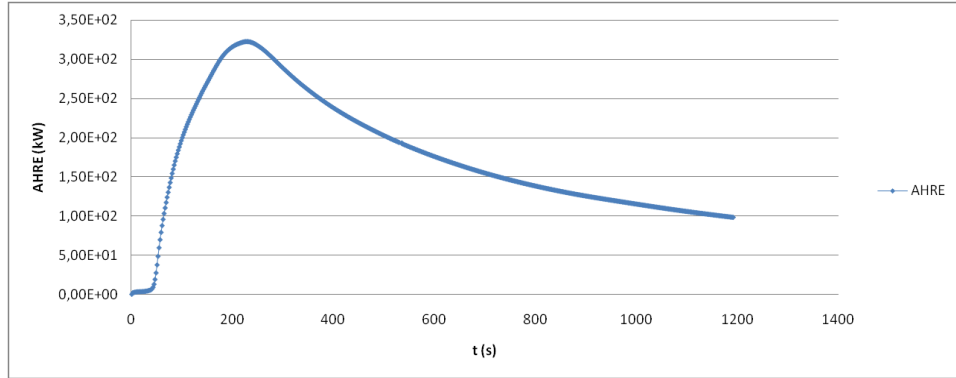
Şekil A.1.9. Beyaz 90 ortalama ısı salım hızı (HRRav) ve toplam ısı salımı (THR) grafikleri



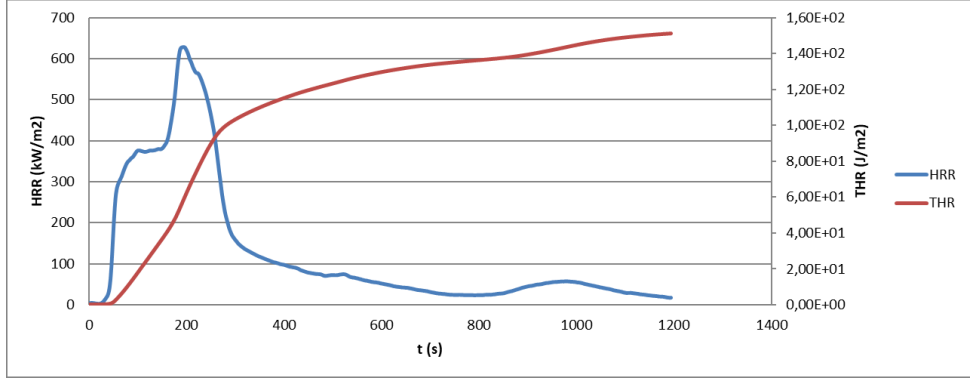
Şekil A.1.10. Beyaz 90 ortalama ısı salım hızı (AHRE) grafiği



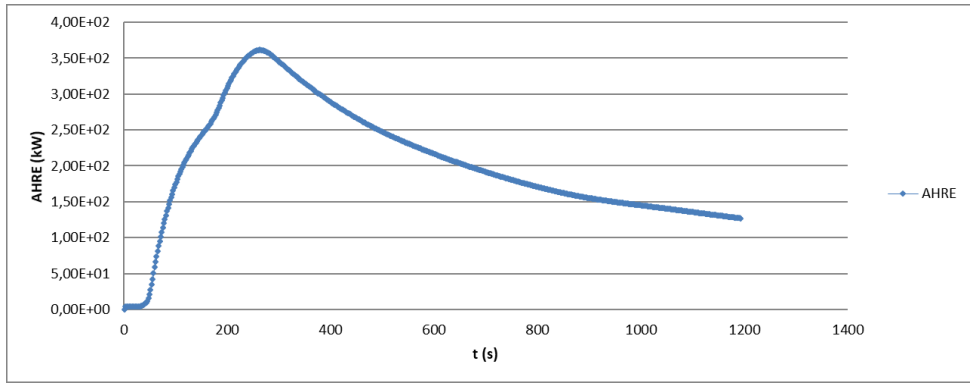
Şekil A.1.11. Sarı krom tekrarda ortalama ısı salım hızı (HRRav) ve toplam ısı salımı (THR) grafikleri



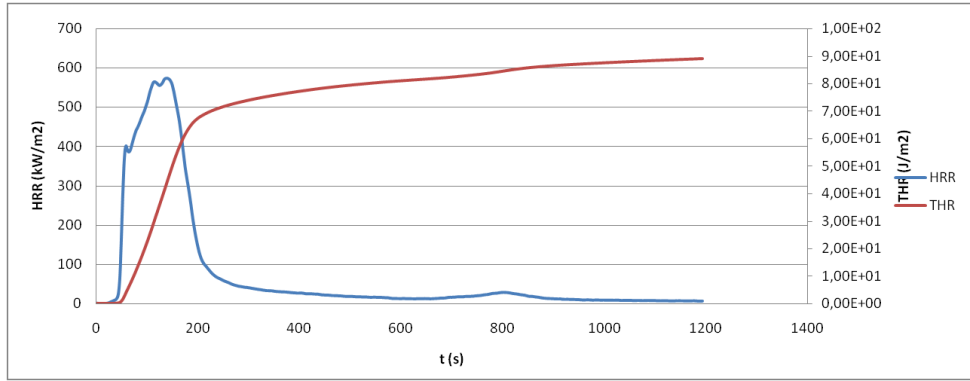
Şekil A.1.12. Sarı krom tekrarda ortalama ısı salım hızı (AHRE) grafiği



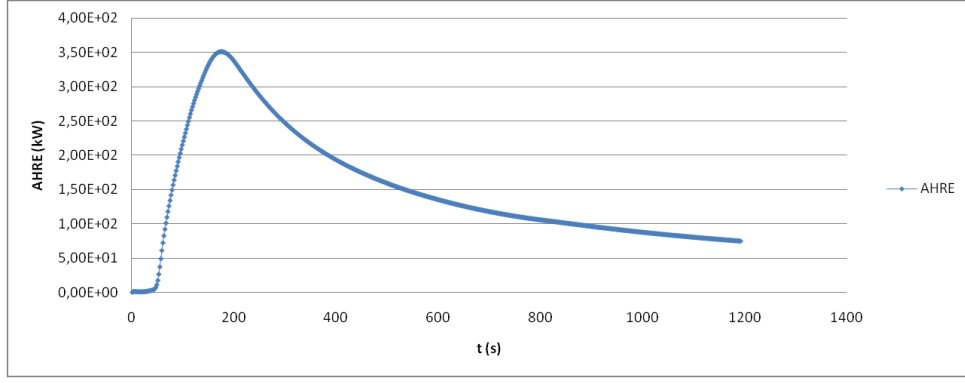
Şekil A.1.13. Sarı oksit tekrarda ortalama ısı salım hızı (HRRav) ve toplam ısı salımı (THR) grafikleri



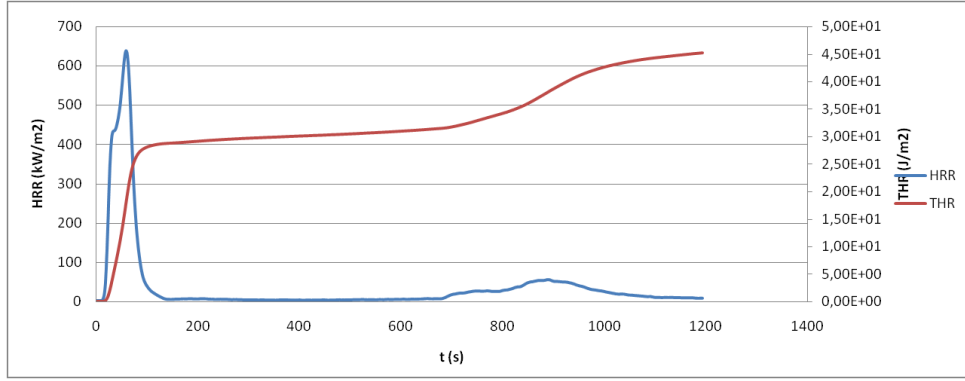
Şekil A.1.14. Sarı oksit tekrarda ortalama ısı salım hızı (AHRE) grafiği



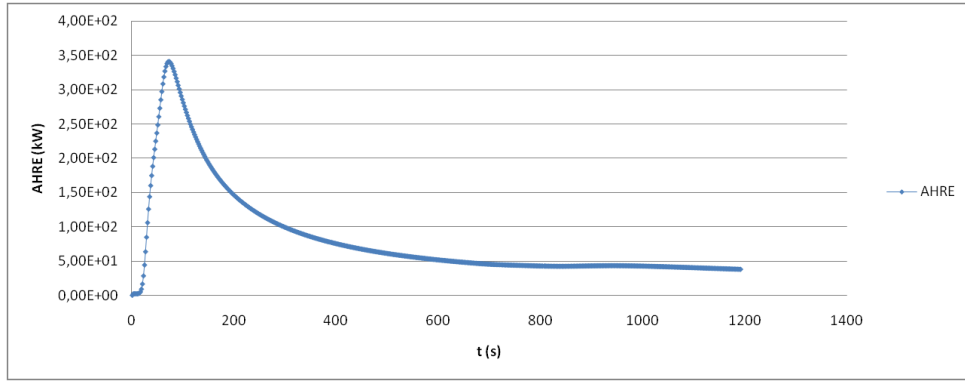
Şekil A.1.15. Kırmızı tekrarda ortalama ısı salım hızı (HRRav) ve toplam ısı salımı (THR) grafikleri



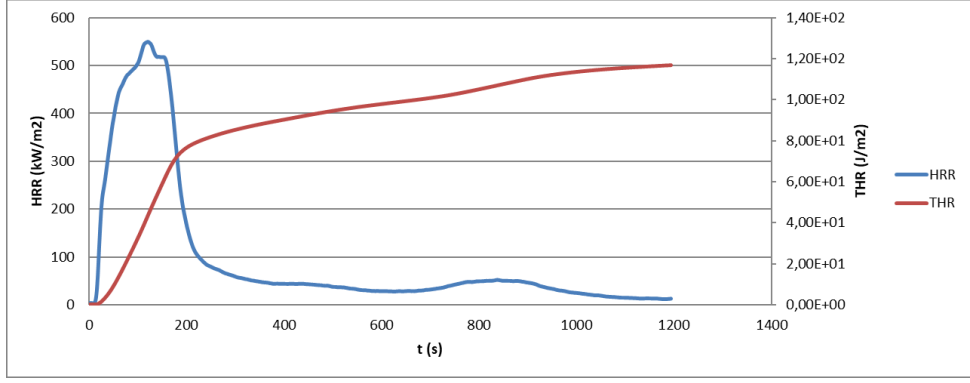
Şekil A.1.16. Kırmızı tekrarda ortalama ısı salım hızı (AHRE) grafiği



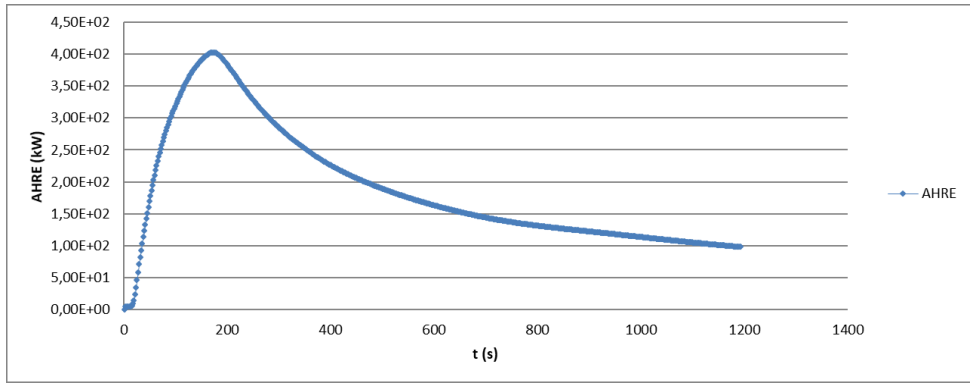
Şekil A.1.17. Mavi tekrarda ortalama ısı salım hızı (HRRav) ve toplam ısı salımı (THR) grafikleri



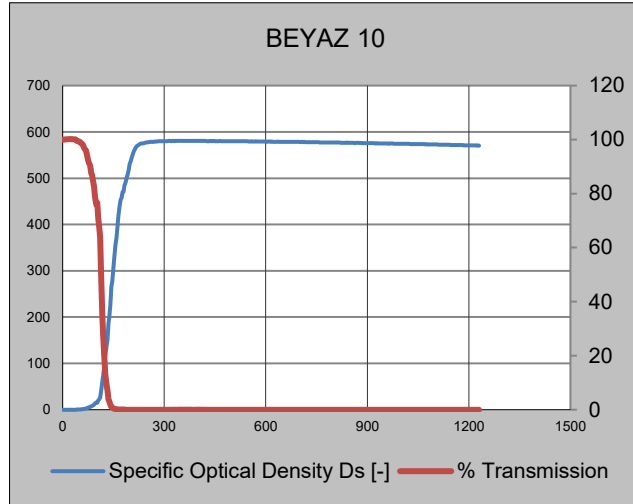
Şekil A.1.18. Mavi tekrarda ortalama ısı salım hızı (AHRE) grafiği



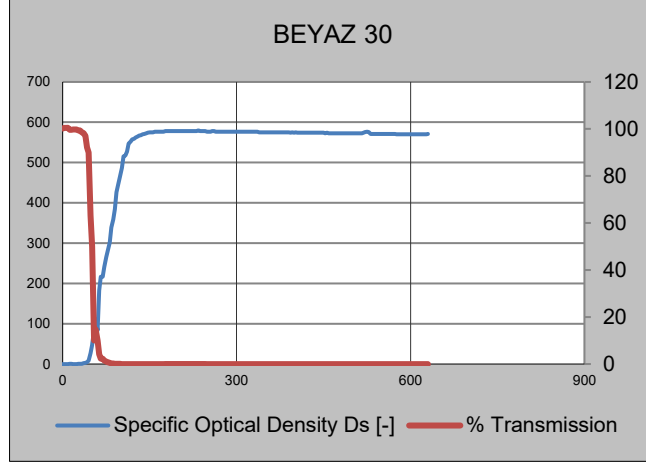
Şekil A 1.19. Siyah tekrarda ortalama ısı salım hızı (HRRav) ve toplam ısı salımı (THR) grafikleri



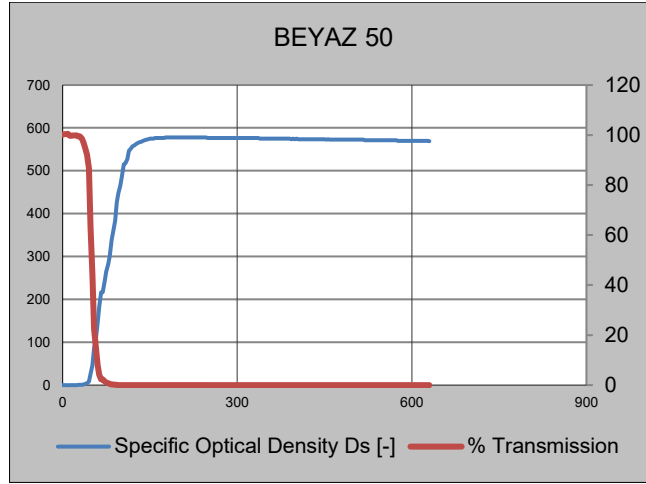
Şekil A 1.20. Siyah tekrarda ortalama ısı salım hızı (AHRE) grafiği



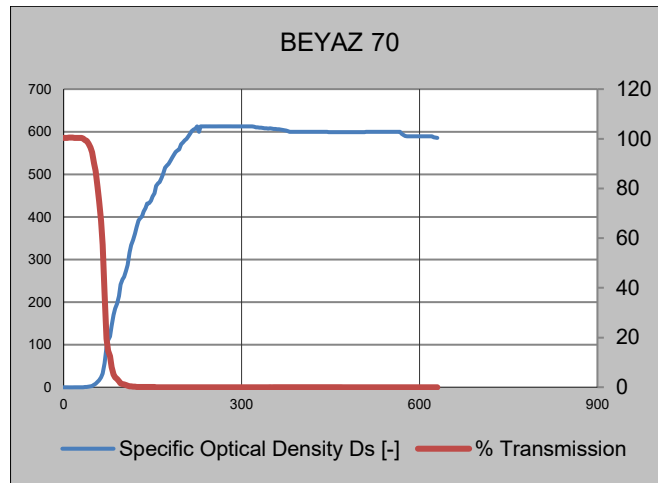
Şekil A 1.21. Beyaz 10 zamana bağlı optik yoğunluk ve % geçirgenlik grafiği



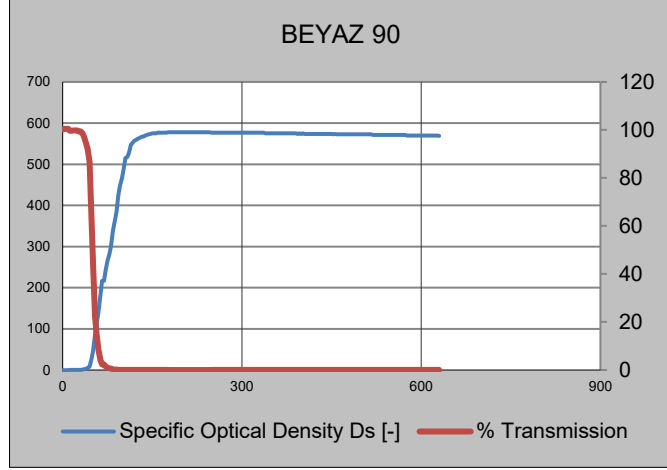
Şekil A 1.22. Beyaz 30 zamana bağlı optik yoğunluk ve % geçirgenlik grafiği



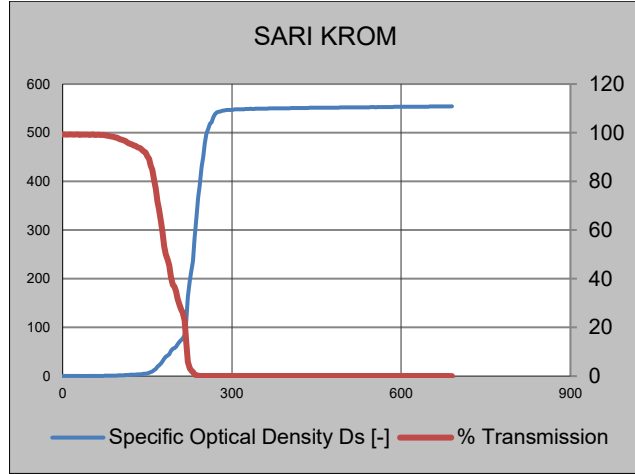
Şekil A 1.23. Beyaz 50 zamana bağlı optik yoğunluk ve % geçirgenlik grafiği



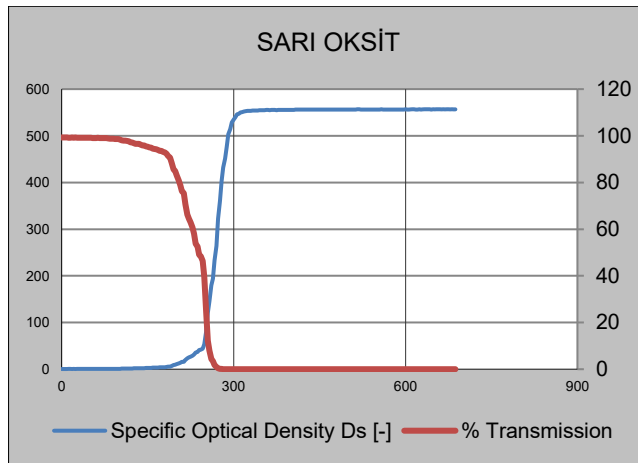
Şekil A 1.24. Beyaz 70 zamana bağlı optik yoğunluk ve % geçirgenlik grafiği



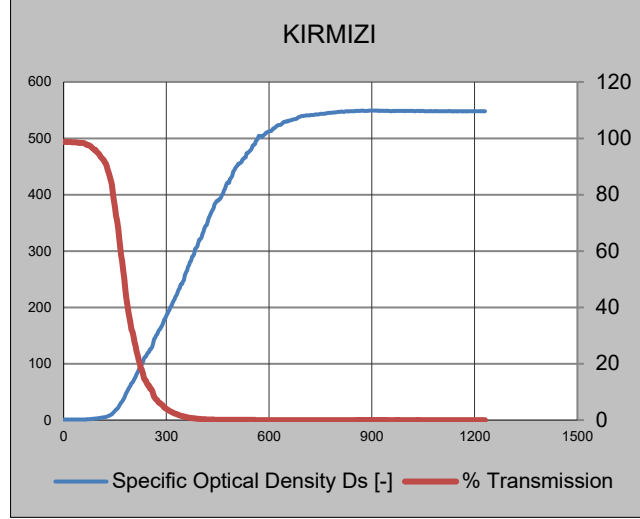
Şekil A 1.25. Beyaz 90 zamana bağlı optik yoğunluk ve % geçirgenlik grafiği



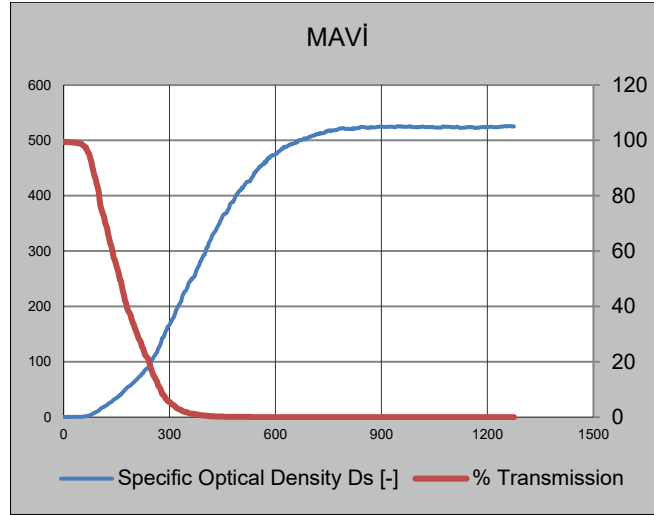
Şekil A 1.26. Sarı krom zamana bağlı optik yoğunluk ve % geçirgenlik grafiği



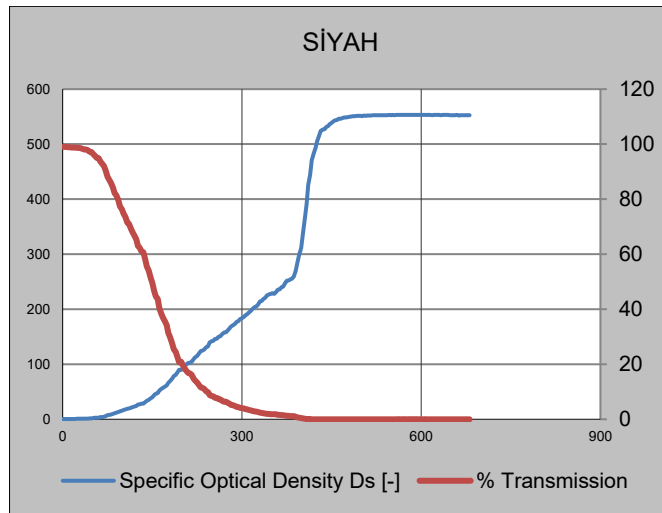
Şekil A 1.27. Sarı oksit zamana bağlı optik yoğunluk ve % geçirgenlik grafiği



Şekil A 1.28. Kırmızı zamana bağlı optik yoğunluk ve % geçirgenlik grafiği



Şekil A 1.29. Mavi zamana bağlı optik yoğunluk ve % geçirgenlik grafiği



Şekil A 1.30. Siyah zamana bağlı optik yoğunluk ve % geçirgenlik grafiği