



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ŞEKİL HAFIZALI EPOKSİ KOMPOZİT MALZEMELERİN HAZIRLANMASI
VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Maha Abobakr Yahya AL-MEZGAGI

DOKTORA TEZİ

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Aralık-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Maha Abobakr Yahya AL-MEZGAGI tarafından hazırlanan “ŞEKİL HAFIZALI EPOKSİ KOMPOZİT MALZEMELERİN HAZIRLANMASI VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” adlı tez çalışması 25/12/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Ahmet OKUDAN

.....

Danışman

Prof. Dr. Hüseyin DEVECİ

.....

Üye

Prof. Dr. Ahmet Özgür SAF

.....

Üye

Prof. Dr. Mustafa TABAKCI

.....

Üye

Doç. Dr. Gülcihan GÜZEL KAYA

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr.

Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması tarafından nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Maha Abobakr Yahya AL-MEZGAGI

Tarih: ../12/2025

ÖZET

DOKTORA TEZİ

ŞEKİL HAFIZALI EPOKSİ KOMPOZİT MALZEMELERİN HAZIRLANMASI VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Maha Abobakr Yahya AL-MEZGAGI

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Hüseyin DEVECİ

2025, 136 Sayfa

Jüri

**Prof. Dr. Hüseyin DEVECİ
Prof. Dr. Mustafa TABAKCI
Prof. Dr. Ahmet OKUDAN
Prof. Dr. Ahmet Özgür SAF
Doç. Dr. Gülcihan GÜZEL KAYA**

Bu çalışmanın temel amacı, üç farklı sertleştirici (metil-5-norbornen-2,3-dikarboksilik anhidrit (MNA), sikloalifatik poliamin ve sitrik asit) kullanılarak bisfenol A ve bisfenol F esaslı epoksi reçinelerden şekil hafızalı polimer kompozitlerin hazırlanmasıdır. Bu çalışmada, polietilen glikol (PEG) plastikleştirici olarak kullanılmıştır. Ayrıca, sepiyolit ve kolemanit farklı oranlarda (1, 3, 5 ve 10 w/w%) dolgu maddesi olarak ilave edilmiştir. Bununla beraber, kompozitlerin yapı ve morfolojisi Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile karakterize edilmiştir. Mekanik ve termal özellikler ile birlikte şekil hafıza davranışı sırasıyla çekme testleri, diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) analizi ve bükme testi ile incelenmiştir. Analiz sonuçları kompozit malzemelerin çekme dayanımının dolgu oranı arttıkça yükseldiğini göstermiştir. Kompozitlerin optimum oranları MNA ve sikloalifatik poliamin ile sertleşen epoksi reçineler için (w/w) %10 PEG ve (w/w) %5 dolgu maddesi, sitrik asit ile sertleşen epoksi reçineler için ise NPEL 128 için (w/w) %10 PEG ve NPEF 170 için (w/w) %5 PEG ve (w/w) %3 dolgu maddesi oranı olarak belirlenmiştir. NPEF 170 epoksi reçine kompozitleri, NPEL 128 kompozitlerine kıyasla çok daha düşük T_g 'e sahiptir. PEG ve dolgu maddelerinin varlığında camsı geçiş sıcaklığı (T_g) düşmüştür. Epoksi kompozitler iyi bir şekil hafıza performansı sergilemiştir. Tüm kompozitlerin geri kazanım süresi sıcaklık arttıkça azalmıştır. Şekil hafıza döngü testlerinde optimum sıcaklık MNA ve sikloalifatik poliamin esaslı sertleştirici için 110 °C, sitrik asit için ise 100 °C olarak belirlenmiştir. Tüm kompozitler yaklaşık %99 ve %98 oranında yüksek geri kazanım değerlerine (R_r) ulaşmıştır. NPEF 170 epoksi kompozitleri daha hızlı şekil geri kazanım süresi göstermiştir. Ayrıca epoksi kompozitler için ardışık on şekil hafıza döngüsü gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: polimer, kompozit, epoksi, şekil hafıza, kolemanit, sepiyolit

ABSTRACT

PhD THESIS

PREPARATION OF SHAPE MEMORY EPOXY COMPOSITE MATERIALS AND INVESTIGATION OF THEIR PROPERTIES

Maha Abobakr Yahya AL-MEZGAGI

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Chemical Engineering**

Advisor: Prof. Hüseyin DEVECİ

2025, 136 Pages

Jury

**Prof. Dr. Hüseyin DEVECİ
Prof. Dr. Mustafa TABAKCI
Prof. Dr. Ahmet OKUDAN
Prof. Dr. Ahmet Özgür SAF
Doç. Dr. Gülcihan GÜZEL KAYA**

The main purpose of this study is to prepare shape memory polymer composites using bisphenol A and bisphenol F-based epoxy resin with three different curing agents (methyl-5-norbornene-2,3-dicarboxylic anhydride (MNA), cycloaliphatic polyamine, and citric acid). In this study, polyethylene glycol (PEG) was used as a plasticizer. Furthermore, different amounts of sepiolite and colemanite (1, 3, 5, and 10 wt.%) were used as a sustainable filler. Moreover, the structure and the morphology of the composites were characterized by Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) and scanning electron microscopy (SEM). The mechanical and thermal properties, as well as shape memory behavior of the composites, were investigated by tensile tests, differential scanning calorimetry (DSC) analysis, and bending tests, respectively. According to the results, the tensile strength of the epoxy increased with increasing filler content. The optimum condition of the composites was 10 wt. % PEG and 5 wt.% filler content for MNA and cycloaliphatic polyamine cured epoxies, and 10 wt. % PEG for NPEL 128 and 5 wt. % PEG for NPEF 170 and 3 wt.% filler content for citric acid cured epoxies. The NPEF 170 epoxy resin composites had much lower glass transition temperature than the NPEL 128 composites. The glass transition temperature (T_g) decreased in the presence of PEG and fillers. The epoxy composites exhibited good shape memory performance. The recovery time of all the composites with increasing temperature. The optimum temperature was found to be at 110 °C for MNA and cycloaliphatic polyamine curing agent, and 100 °C for citric acid in the case of the shape memory cycle tests. All composites achieved high recovery values (R_r) of around 99% and 98%. NPEF 170 epoxy composites showed faster shape recovery time. Ten consecutive shape memory cycles have been conducted for the epoxy composites.

Keywords: polymer, composite, epoxy, shape memory, colemanite, sepiolite

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca ilminden faydalandığım ve yanında çalışmaktan onur duyduğum ve ayrıca tecrübelerinden yararlanırken göstermiş olduğu hoşgörü ve sabırdan dolayı değerli danışmanım Sayın Prof. Dr. Hüseyin DEVECİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme komitesindeki katkılarıyla, tez çalışmam boyunca bilgi ve tecrübelerinden yararlanmama olanak sağlayan değerli hocalarım Prof. Dr. Mustafa TABAKCI ve Prof. Dr. Ahmet OKUDAN'a teşekkür ederim.

Verdiği yardımları ve içten samimiyeti için değerli hocam Dr. Gülcihan GÜZEL KAYA'ya,

Laboratuvarıda beraber çalışırken keyif aldığım, sohbetleri ile her zaman destek olan değerli arkadaşım Firdevs ÇİRLİ'ye teşekkür ederim.

Hep yanımda ve yardım verdiklerinden dolayı arkadaşım Noha BAYAZID'a teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan, daima destek veren, beni motive eden, başarılarımda en büyük pay sahibi olan ve yaşamım boyunca bana tüm şartları sağlayan çok değerli aileme, canım nineme, babama, anneme, teyzeme, ablalarım, küçük kardeşlerime ve değerli arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tez sürecinde manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen kıymetli eşim Majed ALMATARI'ya ve fedakarlıklarından dolayı kızım Jannah'ya teşekkür ederim.

Maha Abobakr Yahya AL-MEZGAGI
KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
ÇİZELGELER LİSTESİ	xiv
1 GİRİŞ	1
2 KOMPOZİT MALZEMELER	4
2.1 Akıllı Malzemeler	4
2.2 Şekil Hafızalı Malzemeler	4
2.3 Şekil Hafızalı Polimerler	5
2.3.1 Şekil hafızalı polimerlerin tarihçesi, gelişimi ve kullanım alanları	6
2.3.2 Şekil hafıza mekanizması	10
2.3.3 Epoksi reçine şekil hafızalı polimer	11
2.3.4 Sertleştiriciler	15
2.3.5 Plastikleştirici	16
2.3.6 Dolgu maddeleri	17
2.3.7 Hızlandırıcı	17
2.3.8 Çözücü	18
3 KAYNAK ARAŞTIRMASI	19
4 MATERYAL VE YÖNTEM	26
4.1 Materyal	26
4.1.1 Epoksi reçineleri	26
4.1.2 Sertleştiriciler	27
4.1.3 Plastikleştirici	28
4.1.4 Dolgu maddeleri	29
4.1.5 Hızlandırıcı	30
4.1.6 Çözücü	30
4.2 Kullanılan Cihazlar	31
4.3 Kompozitlerin Hazırlanması	34
4.3.1 MNA ve sikloalifatik poliamin sertleştirici içeren kompozitler	34
4.3.2 Sitrik asit sertleştirici kullanılarak	35
4.4 Karakterizasyonlar	37
4.4.1 FT-IR analizi	37
4.4.2 SEM ve EDX analizleri	38

4.4.3	Korozyon direnci testi	38
4.4.4	Su sorpsiyon testi	38
4.4.5	Çekme testi	39
4.4.6	DSC analizi.....	41
4.4.7	Yanma testi.....	42
4.4.8	Şekil hafıza testi	42
4.4.9	Şekil hafıza döngüsü.....	44
5	ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	45
5.1	FT-IR Analizi.....	45
5.2	SEM/EDX Analizi.....	46
5.3	Korozyon Direnci Testi	48
5.4	Su Sorpsiyon Testi	52
5.5	Çekme Testi.....	58
5.5.1	Epoksi reçinenin çekme mukavemeti üzerine etkisi	59
5.5.2	Sertleştirici maddelerinin çekme mukavemeti üzerine etkisi	60
5.5.3	Dolgu maddelerinin çekme mukavemeti üzerine etkisi	61
5.6	Termal Özellikleri	63
5.7	Yanma Testi	65
5.8	Şekil Hafıza Testi.....	65
5.8.1	MNA ve sikloalifatik poliamin içeren kompozitler.....	66
5.8.2	SA içeren kompozitler	71
5.9	Şekil Hafıza Döngüsü	76
6	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	77
6.1	Sonuçlar	77
6.2	Öneriler	78
	KAYNAKÇA.....	80
	Ekler A: Mekanik özellikler	87
	Ekler B: Termal özellikler	90
	Ekler C: Şekil hafıza özellikleri.....	94
	Ekler D: Şekil hafıza döngüsü	110

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

ρ:	Yoğunluk (g/cm^3)
E:	Young modülü
T_g:	Camsı geçiş sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
ε:	Kopmada uzama (%)
σ:	Çekme dayanımı (MPa)
Rf:	Şekil sabitleme oranı
Rr:	Şekil geri kazanım oranı
t_r:	Şekil geri kazanım süresi

Kısaltmalar

AM:	Akıllı malzemeler
DGEBA:	Diglisidil eter bisfenol A
DGEBF:	Diglisidil eter bisfenol F
DSC:	Diferansiyel taramalı kalorimetri
EDX:	Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi
EEW:	Epoksi eşdeğer ağırlığı
ER:	Epoksi reçinesi
FT-IR:	Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi
K	Kolemanit
MNA:	Metil-5-norbornen-2,3-dikarbosilik anhidrit
PEG:	Polietilen glikol
S	Sepiyolit
SA:	Sitrik asit
SEM:	Taramalı elektron mikroskobu
SME:	Şekil hafıza etkisi
SMA:	Şekil hafızalı alaşımlar
SMM:	Şekil hafızalı malzemeler
SMP:	Şekil hafızalı Polimer
THF:	Tetrahidrofuran

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. Şekil hafızalı malzemelerin tipleri	5
Şekil 2.2. Scopus veri tabanında SMP'leri ile ilgili yıllık akademik üretimi a) Dünya' da ve b) Türkiye' de	7
Şekil 2.3. Pıhtı giderme cihazı (Yakacki ve Gall, 2009)	8
Şekil 2.4. a) Parçalanabilir SMP esaslı cerrahi iplik prototipi ve b) biyomedikal bir tıkama cihazı (Xia ve ark., 2021)	9
Şekil 2.5. SMP-kompozit menteşenin şekil geri kazanım süreci (Leng ve ark., 2011)	10
Şekil 2.6. Şekil hafızalı bir polimer için şekil hafıza mekanizmasının 3 boyutlu çizimi (Serrano ve Ameer, 2012)	11
Şekil 2.7. Epoksi reçinesinin oluşum reaksiyonu	14
Şekil 4.1. Bisfenol A'nın molekül yapısı – NPEL 128	26
Şekil 4.2. Bisfenol F'nin molekül yapısı – NPEF 170	26
Şekil 4.3. MNA'nın molekül yapısı	27
Şekil 4.4. Sikloalifatik poliaminin molekül yapısı	27
Şekil 4.5. SA'nın molekül yapısı	28
Şekil 4.6. PEG'in molekül yapısı	28
Şekil 4.7. Sepiyolitinin molekül yapısı	29
Şekil 4.8. Kolemanitin molekül yapısı	29
Şekil 4.9. Hızlandırıcının molekül yapısı	30
Şekil 4.10. THF'in molekül yapısı	31
Şekil 4.11. Üniversal çekme-kopma test cihazı	33
Şekil 4.12. Epoksi ile anhidrit reaksiyonu	35
Şekil 4.13. Epoksi ile amin reaksiyonu	35
Şekil 4.14. Epoksi ile sitrik asit reaksiyonu	36
Şekil 4.15. lif, kauçuk, sert ve yumuşak polimerlerde tipik gerinim-gerilim ilişkileri (Saçak, 2017)	40
Şekil 4.16. Çekme testi numunesi	40
Şekil 4.17. Sıcaklığa bağlı olarak elde edilen DSC eğrisi.	41
Şekil 4.18. Bükme testinin şematik gösterimi	43
Şekil 4.19. L 'nin şematik gösterimi	44
Şekil 5.1. a) MNA ve b) sikloalifatik poliamin ile sertleştirilen R1 kompozitlerin FT-IR spektrumları	45
Şekil 5.2. Farklı sertleştiriciler ile kürlen R2 reçinesine ve SA ile kürlen R1 reçinesine ait FT-IR spektrumları	46
Şekil 5.3. SEM görüntüleri: MNA ile sertleştirilen R1 kompozitler (a) saf epoksi (R1), (b) R1MP10S5K0, (c) R1MP10S0K5 ve sikloalifatik poliamin ile sertleştirilen R1 kompozit (d) saf epoksi (R1), (e) R1AP10S5K0 ve (f) R1AP10S0K5	47
Şekil 5.4. EDX görüntüleri: MNA ile sertleştirilen R1 kompozit (a) R1MP10S5K0, (b) R1MP10S0K5 ve sikloalifatik poliamin ile sertleştirilen R1 kompozit (c) R1AP10S5K0 ve (d) R1AP10S0K5, (Küçük kutucuklarda farklı elementler için yapılan elementel haritalama gösterilmektedir)	48
Şekil 5.5. MNA ile sertleştirilen R1 epoksi reçine kompozit malzemelerin % su sorpsiyon test grafiği	53
Şekil 5.6. MNA ile sertleştirilen R2 epoksi reçine kompozit malzemelerin % su sorpsiyon test grafiği	53

Şekil 5.7. Sikloalifatik poliamin ile sertleştirilen R1 epoksi reçine kompozit malzemelerin % su sorpsiyon test grafiği	54
Şekil 5.8. Sikloalifatik poliamin ile sertleştirilen R2 epoksi reçine kompozit malzemelerin % su sorpsiyon test grafiği	55
Şekil 5.9. SA ile sertleştirilen R1 epoksi reçine kompozit malzemelerin % su sorpsiyon test grafiği	56
Şekil 5.10. SA ile sertleştirilen R2 epoksi reçine kompozit malzemelerin % su sorpsiyon test grafiği	57
Şekil 5.11. Farklı epoksi reçine kompozitlerinin çekme mukavemeti değerleri	60
Şekil 5.12. Farklı sertleştirici kompozitlerinin çekme mukavemeti değerleri.....	61
Şekil 5.13. Farklı dolgu madde oranları a) MNA ve b) sikloalifatik poliamin ile sertleştirilen R1 kompozitlerinin çekme mukavemeti değerleri	62
Şekil 5.14. Farklı dolgu madde oranları a) MNA ve b) sikloalifatik poliamin ile sertleştirilen R2 kompozitlerinin çekme mukavemeti değerleri	63
Şekil 5.15. Farklı dolgu madde miktarı kullanılarak kompozitlerin şekil geri kazanım oranı a) R1 ve b) R2.....	66
Şekil 5.16. Farklı dolgu madde miktarı kullanılarak kompozitlerin şekil geri kazanım süresi a) R1 ve b) R2.....	67
Şekil 5.17. Farklı sıcaklıklarda kompozitlerin şekil geri kazanım oranı a) R1 ve b) R2.....	68
Şekil 5.18. Farklı sıcaklıklarda kompozitlerin şekil geri kazanım süresi a) R1 ve b) R2	68
Şekil 5.19. Farklı epoksi reçine kullanılarak elde edilen kompozitlerin şekil geri kazanım oranı	69
Şekil 5.20. Farklı epoksi reçine kullanılarak elde edilen kompozitlerin şekil geri kazanım süresi	69
Şekil 5.21. Farklı sertleştiriciler kullanılarak elde edilen kompozitlerin şekil geri kazanım oranı	70
Şekil 5.22. Farklı sertleştiriciler kullanılarak elde edilen kompozitlerin şekil geri kazanım süresi	71
Şekil 5.23. Farklı sitrik asit oranları ile kürlenmiş (a) R1 ve (b) R2 kompozitlerinin sıcaklık ile şekil geri kazanım oranı ilişkisi	73
Şekil 5.24. Farklı sitrik asit oranları ile kürlenmiş (a) R1 ve (b) R2 kompozitlerinin sıcaklık ile şekil geri kazanım süresi ilişkisi.....	73
Şekil 5.25. Farklı dolgu madde oranları ile kürlenmiş iki farklı saf epoksi sisteminin (a) R1 ve (b) R2 sıcaklık ile şekil geri kazanım oranı ilişkisi	75
Şekil 5.26. Farklı dolgu madde oranları ile kürlenmiş iki farklı saf epoksi sisteminin (a) R1 ve (b) R2 sıcaklık ile şekil geri kazanım süresi ilişkisi	75
 Şekil B 1. MNA ile kürlenmiş R1'in DSC analizi a) saf epoksi (R1), b) R1MP10S0K0, c) R1MP10S5K0 ve d) R1MP10S0K5	90
Şekil B 2. Sikloalifatik poliamin ile kürlenmiş R1'in DSC analizi a) saf epoksi (R1), b) R1AP10S0K0, c) R1AP10S5K0 ve d) R1AP10S0K5	91
Şekil B 3. MNA ile kürlenmiş R2'nin DSC analizi a) saf epoksi (R2), b) R2MP10S0K0, c) R2MP10S5K0 ve d) R2MP10S0K5	91
Şekil B 4. Sikloalifatik poliamin ile kürlenmiş R2'nin DSC analizi a) saf epoksi (R2), b) R2AP10S0K0, c) R2AP10S5K0 ve d) R2AP10S0K5	92
Şekil B 5. SA ile kürlenmiş R1'nin DSC analizi a) saf epoksi (R1), b) R1SAP5S0K0, c) R1SAP5S3K0 ve d) R1SAP5S0K3.....	93

Şekil B 6. SA ile kürlenmiş R2'nin DSC analizi a) saf epoksi (R2), b) R2SAP10S0K0, c) R2SAP10S3K0 ve d) R2SAP10S0K3	93
--	----

Şekil C 1. a) 90 °C, b) 100 °C, c) 110 °C ve d) 120 °C'de MNA ile kürlenen R1MP10SyK0 kompozitlerinin sabit şekli (Her görüntüde sepiyolit miktarı soldan sağa doğru azalmaktadır.)	94
--	----

Şekil C 2. a) 90 °C, b) 100 °C, c) 110 °C ve d) 120 °C'de MNA ile kürlenen R1MP10S0Kz kompozitlerinin sabit şekli (Her görüntüde kolemanit miktarı soldan sağa doğru azalmaktadır.)	95
--	----

Şekil C 3. a) 90 °C, b) 100 °C, c) 110 °C ve d) 120 °C'de sikloalifatik poliamin ile kürlenen R1AP10SyK0 kompozitlerinin sabit şekli (Her görüntüde sepiyolit miktarı soldan sağa doğru azalmaktadır.)	96
---	----

Şekil C 4. a) 90 °C, b) 100 °C, c) 110 °C ve d) 120 °C'de sikloalifatik poliamin ile kürlenen R1AP10S0Kz kompozitlerinin sabit şekli (Her görüntüde dolgu içeriğinin soldan sağa doğru azalmaktadır.)	97
--	----

Şekil C 5. a) 90 °C, b) 100 °C, c) 110 °C ve d) 120 °C'de MNA ile kürlenen R2MP10SyK0 kompozitlerinin sabit şekli (Her görüntüde sepiyolit miktarı soldan sağa doğru azalmaktadır.)	98
--	----

Şekil C 6. a) 90 °C, b) 100 °C, c) 110 °C ve d) 120 °C'de MNA ile kürlenen R2MP10S0Kz kompozitlerinin sabit şekli (Her görüntüde kolemanit miktarı soldan sağa doğru azalmaktadır.)	99
--	----

Şekil C 7. a) 90 °C, b) 100 °C, c) 110 °C ve d) 120 °C'de sikloalifatik poliamin ile kürlenen R2AP10SyK0 kompozitlerinin sabit şekli (Her görüntüde sepiyolit miktarı soldan sağa doğru azalmaktadır.)	100
---	-----

Şekil C 8. a) 90 °C, b) 100 °C, c) 110 °C ve d) 120 °C'de sikloalifatik poliamin ile kürlenen R2AP10S0Kz kompozitlerinin sabit şekli (Her görüntüde kolemanit miktarı soldan sağa doğru azalmaktadır.)	101
---	-----

Şekil C 9. a) 90 b) 100 c) 110 d) 120 °C'de farklı sitrik asit oranları ile kürlenen saf epoksi (R1) şekil sabiti (Her görüntüde SA miktarı soldan sağa doğru azalmaktadır.)	102
---	-----

Şekil C 10. a) 90 b) 100 c) 110 d) 120 °C'de farklı sitrik asit oranları ile kürlenen saf epoksi (R2) şekil sabiti (Her görüntüde SA miktarı soldan sağa doğru azalmaktadır.)	103
--	-----

Şekil C 11. a) 80 b) 90 c) 100 d) 110 °C'de farklı PEG oranları ile kürlenen saf epoksi (R1) şekil sabiti (Her görüntüde PEG miktarı soldan sağa doğru azalmaktadır.)	104
--	-----

Şekil C 12. a) 80 b) 90 c) 100 d) 110 °C'de farklı PEG oranları ile kürlenen saf epoksi (R2) şekil sabiti (Her görüntüde PEG miktarı soldan sağa doğru azalmaktadır.)	105
--	-----

Şekil C 13. a) 80 b) 90 c) 100 d) 110 °C'de SA ile kürlenen R1SAP5S0Kz kompozitlerinin sabit şekli (Her görüntüde kolemanit miktarı soldan sağa doğru azalmaktadır.)	106
---	-----

Şekil C 14. a) 80 b) 90 c) 100 d) 110 °C'de SA ile kürlenen R2SAP5S0Kz kompozitlerinin sabit şekli (Her görüntüde kolemanit miktarı soldan sağa doğru azalmaktadır.)	107
---	-----

Şekil C 15. a) 80 b) 90 c) 100 d) 110 °C'de SA ile kürlenen R1SAP5SyK0 kompozitlerinin sabit şekli (Her görüntüde sepiyolit miktarı soldan sağa doğru azalmaktadır.)	108
---	-----

Şekil C 16. a) 80 b) 90 c) 100 d) 110 °C'de SA ile kürlenen R2SAP5SyK0 kompozitlerinin sabit şekli (Her görüntüde sepiyolit miktarı soldan sağa doğru azalmaktadır.)	109
---	-----

Şekil D 1. MNA ile kürlenen R1 kompozitlerin ilk döngüdeki a) Sabit ve b) geri kazanım şekli ve son döngüdeki c) sabit ve d) geri kazanım şekli (her görüntüde sağdan sola: saf epoksi (R1), R1MP10S0K0, R1MP10S5K0 ve R1MP10S0K5)	110
---	-----

Şekil D 2. Sikloalifatik poliamin ile kürlenen R1 kompozitlerin ilk döngüdeki a) Sabit ve b) geri kazanım şekli ve son döngüdeki c) sabit ve d) geri kazanım şekli (her görüntüde sağdan sola: saf epoksi (R1), R1AP10S0K0, R1AP10S5K0 ve R1AP10S0K5)	110
--	-----

Şekil D 3. MNA ile kürlenene R2 kompozitlerin ilk döngüdeki a) Sabit ve b) geri kazanım şekli ve son döngüdeki c) sabit ve d) geri kazanım şekli (her görüntüde sağdan sola: saf epoksi (R2), R2MP10S0K0, R2MP10S5K0 ve R2MP10S0K5)	113
Şekil D 4. Sikloalifatik poliamin ile kürlenene R2 kompozitlerin ilk döngüdeki a) Sabit ve b) geri kazanım şekli ve son döngüdeki c) sabit ve d) geri kazanım şekli (her görüntüde sağdan sola: saf epoksi (R2), R2AP10S0K0, R2AP10S5K0 ve R2AP10S0K5).....	113
Şekil D 5. SA ile kürlenene R1 kompozitlerin ilk döngüdeki a) Sabit ve b) geri kazanım şekli ve son döngüdeki c) sabit ve d) geri kazanım şekli (her görüntüde sağdan sola: saf epoksi (R1), R1SAP10S0K0, R1SAP10S0K3 ve R1SAP10S3K0).....	116
Şekil D 6. SA ile kürlenene R2 kompozitlerin ilk döngüdeki a) Sabit ve b) geri kazanım şekli ve son döngüdeki c) sabit ve d) geri kazanım şekli (her görüntüde sağdan sola: saf epoksi (R2), R2SAP10S0K0, R2SAP10S0K3 ve R2SAP10S3K0	116



ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 2.1. Epoksi reçine sistemlerinde kullanılan sertleştiricilerin bazı özellikleri	16
Çizelge 4.1. NPEL 128 'in özellikleri.....	26
Çizelge 4.2. NPEF 170'in özellikleri.....	27
Çizelge 4.3. PEG'in özellikleri	28
Çizelge 4.4. Sepiyolit ve kolemanit dolgu maddelerinin özellikleri	29
Çizelge 4.5. Hızlandırıcının özellikleri	30
Çizelge 4.6. THF'in özellikleri	31
Çizelge 4.7. Numunenin ebadı	40
Çizelge 5.1. Kompozit malzemelerin (%10 HCl) korozyon testi sonuçları	49
Çizelge 5.2. Kompozit malzemelerin (%10 NaOH) korozyon testi sonuçları	50
Çizelge 5.3. Kompozit malzemelerin (%3 NaCl) korozyon testi sonuçları	51
Çizelge 5.4. MNA ile kürlenene epoksi reçinelerin kompozit malzemelerin % su sorpsiyon test sonuçları (g).....	52
Çizelge 5.5. Sikloalifatik poliamin ile kürlenene epoksi reçinelerin kompozit malzemelerin % su sorpsiyon test sonuçları (g).....	54
Çizelge 5.6. SA ile kürlenene epoksi reçinelerin kompozit malzemelerin % su sorpsiyon test sonuçları (g).....	56
Çizelge 5.7. Bazı polimerlerin su sorpsiyon değerleri (Saçak, 2017)	58
Çizelge 5.8. Kompozit malzemelerin T _g değerleri	64
Çizelge 5.9. Kompozit malzemelerin alev geciktirici özellikleri	65
Çizelge A 1. PEG içeren farklı miktarlarda MNA ile kürlenene R1 epoksinin mekanik özellikleri	87
Çizelge A 2. PEG içeren farklı miktarlarda sikloalifatik poliamin ile kürlenene R1 epoksinin mekanik özellikleri	87
Çizelge A 3. Farklı dolgu içeriğinin bir fonksiyonu olarak MNA ile kürlenene R1MP10S0K0 kompozitlerinin mekanik özellikleri.....	87
Çizelge A 4. Farklı dolgu içeriğinin bir fonksiyonu olarak sikloalifatik poliamin ile kürlenene R1AP10S0K0 kompozitlerinin mekanik özellikleri.....	88
Çizelge A 5. Farklı dolgu içeriğinin bir fonksiyonu olarak MNA ile kürlenene R2MP10S0K0 kompozitlerinin mekanik özellikleri.....	88
Çizelge A 6. Farklı dolgu içeriğinin bir fonksiyonu olarak sikloalifatik poliamin ile kürlenene R2AP10S0K0 kompozitlerinin mekanik özellikleri.....	89
Çizelge C 1. Farklı sepiyolit oranları kullanıldığında farklı sıcaklıklarda MNA ile kürlenene R1 kompozitlerinin şekil hafıza özellikleri	94
Çizelge C 2. Farklı kolemanit oranları kullanıldığında farklı sıcaklıklarda MNA ile kürlenene R1 kompozitlerinin şekil hafıza özellikleri	95
Çizelge C 3. Farklı sepiyolit oranları kullanıldığında farklı sıcaklıklarda sikloalifatik poliamin ile kürlenene R1 kompozitlerinin şekil hafızası özellikleri	96
Çizelge C 4. Farklı kolemanit oranları kullanıldığında farklı sıcaklıklarda sikloalifatik poliamin ile kürlenene R1 kompozitlerinin şekil hafızası özellikleri	97
Çizelge C 5. Farklı sepiyolit oranları kullanıldığında farklı sıcaklıklarda MNA ile kürlenene R2 kompozitlerinin şekil hafızası özellikleri	98
Çizelge C 6. Farklı kolemanit oranları kullanıldığında farklı sıcaklıklarda MNA ile kürlenene R2 kompozitlerinin şekil hafızası özellikleri	99

Çizelge C 7. Farklı sepiyolit oranları kullanıldığında farklı sıcaklıklarda sikloalifatik poliamin ile kürlen R2 kompozitlerinin şekil hafızası özellikleri	100
Çizelge C 8. Farklı kolemanit oranları kullanıldığında farklı sıcaklıklarda sikloalifatik poliamin ile kürlen R2 kompozitlerinin şekil hafızası özellikleri	101
Çizelge C 9. Farklı sıcaklıklarda farklı sitrik asit oranları ile kürlen saf epoksi (R1) şekil hafıza özellikleri	102
Çizelge C 10. Farklı sıcaklıklarda farklı sitrik asit oranları ile kürlen saf epoksi (R2) şekil hafıza özellikleri	103
Çizelge C 11. Farklı sıcaklıklarda farklı PEG oranları ile kürlen saf epoksi (R1) şekil hafıza özellikleri	104
Çizelge C 12. Farklı sıcaklıklarda farklı PEG oranları ile kürlen saf epoksi (R2) şekil hafıza özellikleri	105
Çizelge C 13. Farklı kolemanit oranları kullanıldığında farklı sıcaklıklarda SA ile kürlen R1 kompozitlerinin şekil hafızası özellikleri	106
Çizelge C 14.. Farklı kolemanit oranları kullanıldığında farklı sıcaklıklarda SA ile kürlen R2 kompozitlerinin şekil hafızası özellikleri	107
Çizelge C 15. Farklı sepiyolit oranları kullanıldığında farklı sıcaklıklarda SA ile kürlen R1 kompozitlerinin şekil hafızası özellikleri	108
Çizelge C 16. Farklı sepiyolit oranları kullanıldığında farklı sıcaklıklarda SA ile kürlen R2 kompozitlerinin şekil hafızası özellikleri	109
Çizelge D 1. 110 °C'de MNA ile kürlen R1 kompozitlerinin şekil hafıza döngüsünün özellikleri	111
Çizelge D 2. 110 °C'de sikloalifatik poliamin ile kürlen R1 kompozitlerinin şekil hafızası döngüsü özellikleri	112
Çizelge D 3. 110 °C'de MNA ile kürlen R2 kompozitlerinin şekil hafızası döngüsü özellikleri	114
Çizelge D 4. 110°C'de sikloalifatik poliamin ile kürlen R2 kompozitlerinin şekil hafızası döngüsü özellikleri	115
Çizelge D 5. 100°C'de SA ile kürlen R1 kompozitlerinin şekil hafıza döngüsünün özellikleri	117
Çizelge D 6. 100°C'de SA ile kürlen R2 kompozitlerinin şekil hafıza döngüsünün özellikleri	118

1 GİRİŞ

Şekil hafızalı polimerler, bir veya birden fazla formu "hafızasına alma" yeteneğine sahip olan ve uygun bir uyarıcıya (örneğin ısı, manyetizma, elektrik, pH, su/nem veya ışık) maruz kaldıklarında orijinal formlarına geri dönebilen polimerlerdir (Madbouly ve Lendlein, 2010; Leng ve ark., 2011; Sauter ve ark., 2013; Panda ve ark., 2021; Panda ve ark., 2022). Geçici bir formdan kalıcı forma dış sıcaklık uyarısıyla geçiş yapabilen şekil hafızalı polimerler “termo-tepkisel şekil hafızalı polimerler” olarak adlandırılmaktadır. Bu polimerler camsı geçiş sıcaklığı (T_g) üstüne çıkıldığında belirli bir forma şekillendirilebilme ve orijinal şekillerini yeniden kazanabilme özellikleri sayesinde bilim insanlarının ve mühendislerin ilgisini çekmektedir.

Şekil hafızalı epoksi polimerleri, olağanüstü boyutsal kararlılıkları ve şekil hafızası yetenekleri nedeniyle en umut verici akıllı malzemelerden biri olarak kabul edilmektedir (Hu ve ark., 2021). Epoksi reçineleri, hem moleküler içi hem de moleküler arası çapraz bağlanmalar yoluyla üç boyutlu (3B) bir polimer ağı oluşturabilen benzersiz bir organik makromolekül sınıfı olduklarından, en uyarlanabilir termoset polimer türü olarak öne çıkmaktadır (Kandola ve ark., 2022). Epoksi reçineleri; modelleme bileşikler, yapıştırıcılar, kaplamalar, emdirme malzemeleri, yüksek performanslı kompozitler (Tümen ve ark., 2021), yalıtım malzemeleri, elektronik cihazların muhafaza ve ambalaj malzemeleri (Shundo ve ark., 2022), otomotiv astarları, baskılı devre kartları, yarı iletkenler ve havacılık kompozitleri (Pham ve Marks, 2000) gibi çok çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu yaygın kullanım, reçinelerin üstün mekanik özellikleri, birçok yüzeye karşı yüksek yapışma yeteneği, ısıya ve çeşitli kimyasallara karşı iyi direnç göstermesi gibi avantajlardan kaynaklanmaktadır (Jin ve ark., 2015). Bununla birlikte, epoksi reçineler kırılganlık, sınırlı esneklik ve zayıf darbe dayanımı gibi bazı dezavantajlara sahiptir ve bu durum bu malzemelerin yaygın kullanımını kısıtlamaktadır (Yanardag ve ark., 2022). Bu nedenle epoksi esaslı malzemelerin güçlendirilmesi ve dayanıklılığının artırılması hem ulusal hem de uluslararası düzeyde araştırmaların odak noktası haline gelmiştir (Wei ve ark., 2023). Polimer matrisine dolgu maddelerinin eklenmesi, sertlik, dayanıklılık artıran ve kalıplama büzülmesini azaltan yaygın bir yöntemdir. Ayrıca üretim maliyetlerini önemli ölçüde azaltmaktadır. Karbon nanotüpler, grafen, $ZrSiO_4$, Al_2O_3 , SiC , bor nitrür, grafen oksit, stronsiyum titanat,

titanyum dioksit, ceviz kabuğu, halloysit nanotüpleri, kil vb. dolgu maddeleri (Białkowska ve ark., 2023; Maurya ve ark., 2023; Ogbonna ve ark., 2023; Perumal ve ark., 2023; Shahabaz ve ark., 2023; Shejkar ve ark., 2023; Turaka ve Bandaru, 2023; Prabhu ve ark., 2024) epoksi reçinelerin mekanik ve termal özelliklerini iyileştirmek amacıyla pek çok çalışmada kullanılmıştır.

Polimer kompozitlerde dolgu maddesi olarak kullanılan bor minerallerine yönelik; gelişmiş mekanik özellikler, alev geciktiricilik, sınırlı su absorpsiyonu gibi avantajlar sağlamak amacıyla yapılan çok sayıda çalışma yayımlanmıştır (Soykan ve Valiyeva, 2020). Bor minerallerinden biri olan kolemanit ($2\text{CaO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), yaklaşık $2,4 \text{ g/cm}^3$ özgül ağırlığa ve 4–4,5 arasında değişen bir sertlik derecesine sahip kalsiyum borat mineralidir. Saf kolemanitin B_2O_3 içeriği yaklaşık %51 civarındadır (Gencel ve ark., 2010). Dünyadaki B_2O_3 rezervlerinin yaklaşık %73'ü Türkiye'de bulunmaktadır (Kara ve ark., 2023).

Sepiyolit ise doğal yapılı, lifsi bir kil minerali olup genel kimyasal formülü $\text{Si}_{12}\text{O}_{30}\text{Mg}_8(\text{OH})_4(\text{H}_2\text{O})_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ olan, mikrokristalin yapıda hidratlı magnezyum silikat olarak sınıflandırılmaktadır (Nohales ve ark., 2006). Sepiyolit en karakteristik özelliği uzamış lifsi yapısıdır. Polimer matrisine dahil edildiğinde, sepiyolit mekanik güçlendirme ve termal kararlılık üzerinde önemli katkılar sağladığı gösterilmiştir (Ahmetli ve ark., 2012). Bu iki dolgu maddesinin, epoksi reçinelerin termo-duyarlı şekil hafızası özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu dolgu malzemeleri, epoksi ile birleştirildiklerinde kompozitlerin termal kararlılığını, alev geciktirici özelliklerini ve mekanik performansını artırma, ayrıca T_g değiştirme potansiyeline sahiptir. Bu tür iyileştirmeler, yüksek düzeyde mekanik ve termal performans gerektiren endüstrilerde, epoksi esaslı şekil hafızalı malzemelerin elektronik, otomotiv ve havacılık gibi kullanım alanlarını genişletmektedir.

Her ne kadar epoksi kompozitler üzerine çok sayıda araştırma yapılmış olsa da, kolemanit veya sepiyolit içeren epoksi kompozitlerin termo-duyarlı şekil hafızası davranışına dair ayrıntılı bilgi sunan herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu durum göz önünde bulundurularak, bu çalışmada farklı bileşimlere sahip iki farklı dolgu maddesi kullanılarak termo-duyarlı şekil hafızalı epoksi polimer kompozitleri hazırlanmıştır. Bu çalışmada dolgu maddesi miktarının, sertleştirici türünün ve plastikleştirici ilavesi ile kompozit malzemelerin mekanik ve termal özellikleri ve şekil

hafızası davranışları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Kompozitlerin şekil hafızası özelliklerini değerlendirmek amacıyla bükme testi uygulanmıştır. Ardından şekil hafızası performansının kararlılığını incelemek için döngü testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, kompozitlerin optimum sıcaklıkta iyi düzeyde şekil hafızası yeteneği gösterdiğini ortaya koymuştur.



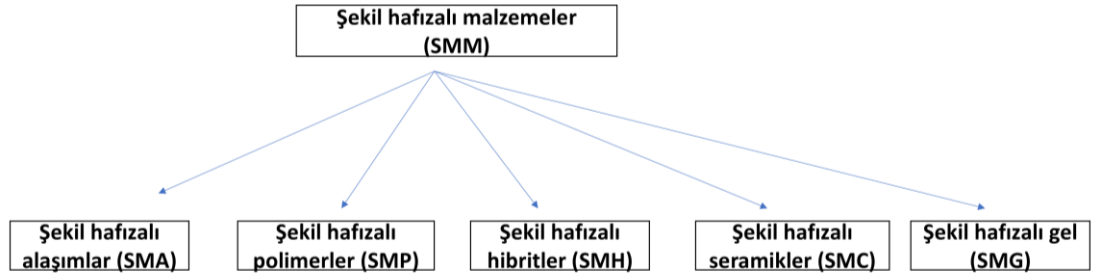
2 KOMPOZİT MALZEMELER

2.1 Akıllı Malzemeler

Son yıllarda, akıllı malzemelerin (AM) çeşitli uygulamalarda kullanımı, dış uyaranlara karşı özelliklerini değiştirebilme yetenekleri nedeniyle giderek daha gerekli hâle gelmiştir. Bu malzemelerin en önemli avantajlarından biri tersine çevrilebilme özellikleridir; bu durum algılama, kendini iyileştirme ve çevresel koşullara uyum sağlama kabiliyetleri ile birleşerek onları ileri malzemeler arasında benzersiz kılmaktadır. Akıllı malzemeler belirli dış sinyalleri algılayabilmekte ve önceden tanımlanmış görevleri yerine getirmek amacıyla kendiliğinden harekete geçebilmektedir. Bu malzemeler, yapılarında hem algılama hem de eyleme geçirme fonksiyonlarını barındırmaları nedeniyle sıklıkla akıllı, veya uyarlanabilir malzemeler olarak tanımlanmaktadır (Qader ve ark., 2019). Akıllı malzemeleri geleneksel malzemelerden ayıran temel özellikler arasında geçicilik (farklı uyaranlara karşı tepki verme ve farklı şekillerde bulunabilme), hızlı tepki (uyaran karşısında gecikmeksizin tepki verme), kendi kendine hareket (malzeme bünyesinde gömülü zekâ), seçicilik (belirli uyaranlara özgü ve öngörülebilir tepki) ve doğrudanlık (şekil değişimi ile tepkinin aynı noktada gerçekleşmesi) yer almaktadır (Mohamed, 2017).

2.2 Şekil Hafızalı Malzemeler

Şekil hafızalı malzemeler (SMM), belirli bir uyarıcı uygulandığında, önemli ve görünüşte plastik bir deformasyondan orijinal şekillerine geri dönebilme yetenekleri ile karakterize edilir. Bu olgu, şekil hafıza etkisi (SME) olarak adlandırılmaktadır (Huang ve ark., 2010). Günümüze kadar çeşitli SMM tipleri geliştirilmiş Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Bunlar arasında şekil hafızalı alaşımlar (SMA) ve şekil hafızalı polimerler (SMP) günümüzde en önemli iki tür olarak öne çıkmaktadır.



Şekil 2.1. Şekil hafızalı malzemelerin tipleri

2.3 Şekil Hafızalı Polimerler

1980'lerde şekil hafızalı polimerler akıllı polimerler olarak sınıflandırılmıştır. Bu polimerler dış uyarılara göre şekillerini hafızaya alma (geçici veya sabit şekillerden orijinal şekline geri kazanımı) potansiyeli göstermektedir. SMP'ler, bir (çift şekilli), iki (üçlü şekilli) veya birkaç (çok şekilli) şekil özellikli olarak sınıflandırılmaktadır. Çevreden gelen uyarılar, sıcaklık (ısıya duyarlı; doğrudan veya dolaylı yollarla tetiklenen sıcaklık değişimi), kimyasal ortam (su, pH, çözücü, redoks koşulları vb.), ışınlama (farklı dalga boyunda ışık) ve mekanik yük (mekanik duyarlı) olabilmektedir. Çoğu durumda, SMP'ler termo-duyarlı (termal olarak aktive edilmiş) olmaktadır. Malzemenin geçici şekilden kalıcı şekline dönmesini için “anahtarlama” veya dönüşüm sıcaklığı (T_{trans}) sağlayan bir faktördür. Bu T_{trans} değeri malzemenin T_g ve/veya erime sıcaklığı (T_m) ile yakından ilişkilidir. Bu nedenle, SMP'ler genellikle anahtar türlerine göre T_g veya T_m bazlı olarak sınıflandırılmaktadır. Termal duyarlı SMP'ler, kalıcı noktalarının doğasına ve anahtarlama alanları ile ilgili termal geçişe göre dört farklı kategoride sınıflandırılabilir: a) $T_{trans}=T_g$ ile fiziksel olarak çapraz bağlı termoplastikler; (b) $T_{trans}=T_m$ ile fiziksel olarak çapraz bağlı termoplastikler, (c) kimyasal olarak çapraz bağlı amorf polimerler ($T_{trans}=T_g$); (d) kimyasal olarak çapraz bağlı yarı kristalli polimer ağlar ($T_{trans}=T_m$) (Leng ve ark., 2011). SMP'ler, SMA ve şekil hafızalı seramiklere kıyasla birçok potansiyel teknik avantaj sunmaktadır. SMP'ler, iyi şekil geri kazanılabilirliği (%400'e kadar geri kazanılabilir gerinim) ve düşük yoğunluk özelliği bu polimerlerin işleminde ve özelliklerin uyarlanması kolaylık göstermektedir. Geçiş sıcaklığı, sertlik, biyolojik olarak bozunabilirlik ve işlevsel olarak derecelendirme kolaylığı, geri kazanım davranışının programlanabilirliği/kontrol edilebilirliği ve bunlara ek olarak en

önemlisi de düşük maliyetle elde edilebilmektedir (Leng ve ark., 2009). SMP'ler ve bunların kompozitleri, inşaat mühendisliği, havacılık, biyomedikal cihazlarda, elektronik cihazlarda, yumuşak robotik cihazlarda, şekil hafıza dizileri, kuru yapışma, akıllı tekstil alanlarında ve daha birçok farklı uygulamalarda akıllı malzemeler olarak kullanılmaktadır.

2.3.1 Şekil hafızalı polimerlerin tarihçesi, gelişimi ve kullanım alanları

Şekil hafızası davranışı, polimerlerde ilk kez 1941 yılında L. B. Vernon tarafından alınan bir Amerika Birleşik Devletleri patenti ile literatüre girmiştir (Vernon ve Vernon, 1941). Söz konusu patentte Vernon, metakrilik asit ester bazlı bir dişçilik materyali tanımlamış ve bu malzemenin ısı uygulandığında orijinal şekline geri dönebilen “elastik hafıza” özelliğine sahip olduğunu belirtmiştir. Bu bulgu, SMA ilk kez 1951 yılında raporlanmasından yaklaşık on yıl öncesine denk gelmektedir. Bu durum, şekil hafızası olgusunun ilk olarak metallerde değil, polimerlerde gözlemlendiğini ortaya koymaktadır. Buna rağmen, SMP'lerin bilimsel ve teknolojik önemi, 1960'lı yıllara kadar geniş çapta fark edilmemiştir. Bu dönemde, kovalent çapraz bağlanmış polietilenin ısı ile büzüşebilen tüpler ve filmler gibi uygulamalarda kullanılmaya başlanması, SMP'lerin ilk ticari kullanımlarını oluşturmuştur (Arditti ve ark., 1971; Dole, 1981). Bu tür malzemeler, yüksek şekil geri kazanım oranları, düşük yoğunluk, kolay işlenebilirlik ve geniş uygulama aralığı gibi avantajları nedeniyle ilgi çekmiştir.

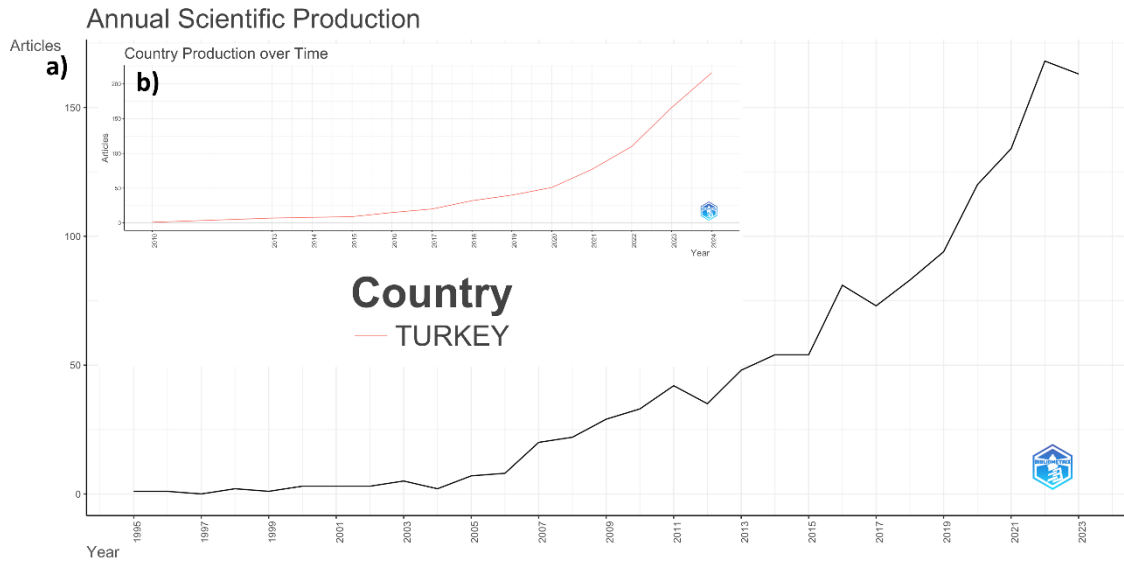
1980'li yılların sonlarına gelindiğinde, polimer kimyasındaki ilerlemelerle birlikte SMP'lere yönelik araştırmalar ciddi anlamda hız kazanmıştır (Liu ve ark., 2007a). Özellikle havacılık, otomotiv, tıp, tekstil ve elektronik gibi sektörlerde akıllı ve çevresel uyarılara yanıt verebilen malzemelere duyulan ihtiyaç, bu alandaki çalışmaları teşvik etmiştir. Günümüzde SMP'ler; ısı, ışık, pH, nem, manyetik alan ve elektriksel uyarılar gibi çeşitli dış etkenlerle harekete geçebilen sistemlerin tasarımında yaygın şekilde kullanılmaktadır.

Son yıllarda, SMP'lere olan akademik ilgi önemli ölçüde artmıştır. Bu eğilim, zamanla bu alanla ilgili bilimsel yayınların sayısındaki artışa açıkça yansımış olup,

SMP'lerin hem temel araştırmalarda hem de uygulamalı mühendislikte giderek artan rolünü vurgulamaktadır.

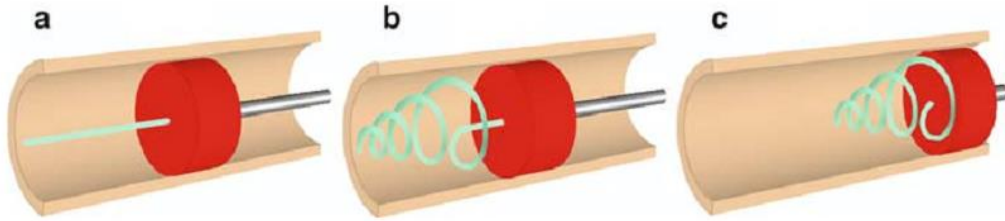
1995–2023 yılları arasında Scopus veri tabanı (Elsevier) kullanılarak, Kimya Mühendisliği alanında yayınlanan “POLYMER” ve “SHAPE MEMORY” konulu akademik çalışmalardan analize uygun olan 1289 adet seçilmiş ve RStudio ortamında Biblioshiny uygulaması aracılığıyla bibliyometrik analiz gerçekleştirilmiştir (şekil 2.2). Elde edilen bulgulara göre, başta in, ABD, Hindistan, Almanya, Güney Kore ve Japonya ölkeleri olmak üzere dünya genelinde “POLYMER” ve “SHAPE MEMORY” konularına ilişkin akademik araştırmaların sayısı yıllık ortalama 19.95 % oranında artış göstermektedir.

Türkiye'de ise 2010–2024 yılları arasında Scopus veri tabanı (Elsevier) kullanılarak, “POLYMER” ve “SHAPE MEMORY” konulu akademik çalışmalardan analize uygun olan 111 adet seçilmiş ve RStudio ortamında Biblioshiny uygulaması aracılığıyla bibliyometrik analiz gerçekleştirilmiştir (şekil 2.2.) Elde edilen bulgulara göre, “POLYMER” ve “SHAPE MEMORY” konularına ilişkin akademik araştırmaların sayısı yıllık ortalama 23.42 % oranında artış göstermektedir.

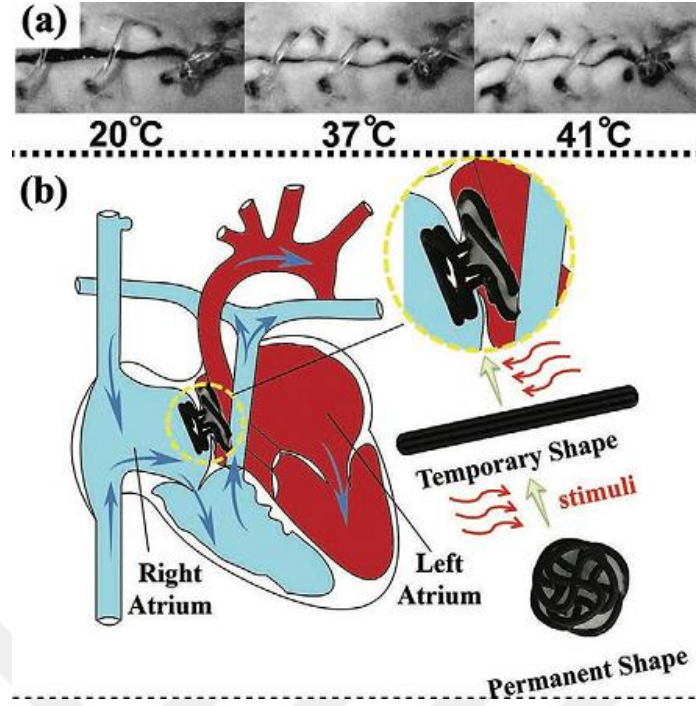


şekil 2.2. Scopus veri tabanında SMP'leri ile ilgili yıllık akademik üretimi a) Dünya' da ve b) Türkiye' de

Çeşitli endüstriyel alanlar arasında SMP'lerin kullanıldığı sektörler içinde, biyomedikal alan; malzemelerin biyouyumluluğu, ayarlanabilir geçiş sıcaklıkları ve uyarana bağlı şekil değişimleri yoluyla minimal girişimsel işlevleri yerine getirebilme yetenekleri sayesinde en umut vadeden alanlardan biri olarak öne çıkmaktadır. SMP'ler geleneksel polimerlere kıyasla yenilikçi özellikleri sayesinde terapötik cihaz tasarımlarında dikkat çekici fırsatlar sunmaktadır (Serrano ve Ameer, 2012). Felç durumunda beyin hücrelerine giden kan akışının birkaç dakika kesilmesi bile geri dönüşü olmayan hücre hasarına veya ölümüne neden olabilmektedir. Bu nedenle hızlı ve etkili müdahale hayati önem taşımaktadır. Maitland araştırma grubu, pıhtı çıkarma cihazlarında SMP kullanımında öncü çalışmalara imza atmıştır (Metzger ve ark., 2002). 2002 yılında gerçekleştirilen bir çalışmada, felç tedavisinde kullanılmak üzere termoset poliüretan esaslı bir SMP cihaz tasarlanmıştır. Tel formunda üretilen bu cihaz, öncelikle pıhtıyı delmekte, ardından distal tarafta kıvrılarak pıhtıya sarılmakta ve sonrasında geri çekilerek pıhtının çıkarılmasını sağlamaktadır (Şekil 2.3) (Yakacki ve Gall, 2009). Aynı yıl, biyolojik olarak parçalanabilir SMP esaslı cerrahi iplik prototipi geliştirilmiştir. Bu iplik, dikiş atıldıktan sonra ısıyla uyarılarak büzülme ve yaranın sıkılaşmasını sağlamaktadır (Şekil 2.4. a). Bunun yanı sıra, atriyal septal defektin tedavisi amacıyla 4D baskı yöntemiyle üretilmiş biyomedikal bir tıkama cihazı tasarlanmış ve manyetik alan altında vivo koşullarda şekil değiştirme kabiliyeti incelenmiştir (Şekil 2.4. b). Bu tür uygulamalar, SMP'lerin biyomedikal alanda minimal invaziv tedavi stratejilerinin geliştirilmesinde önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir (Xia ve ark., 2021).

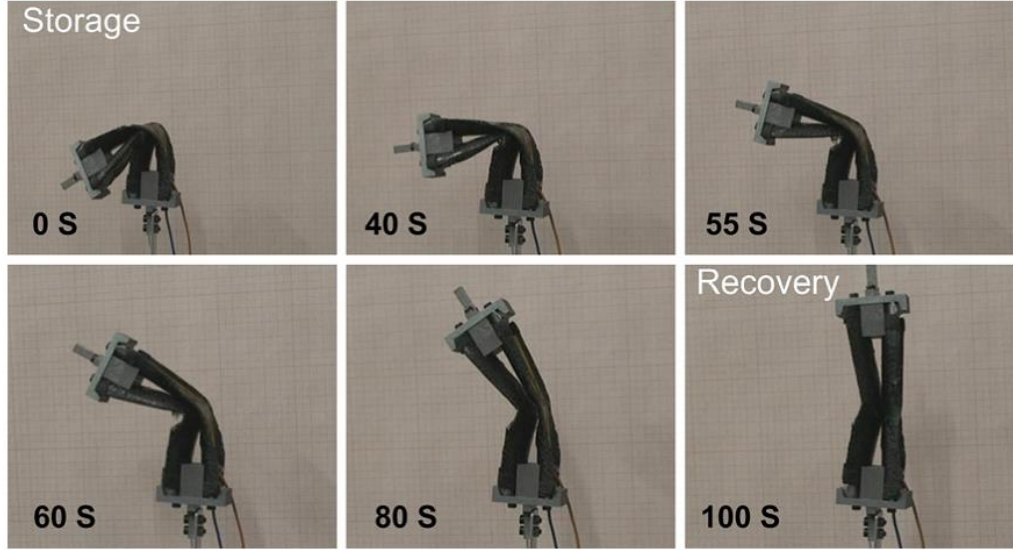


Şekil 2.3. Pıhtı giderme cihazı (Yakacki ve Gall, 2009)



Şekil 2.4. a) Parçalanabilir SMP esaslı cerrahi iplik prototipi ve b) biyomedikal bir tıkama cihazı (Xia ve ark., 2021)

Termo duyarlı SMP'ler düşük maliyet, kontrol edilebilir geri kazanım davranışı, düşük yoğunluk, uzay görevlerine uygunluk ve güvenilir şekil geri kazanımı gibi avantajları sayesinde günümüz ve gelecekteki havacılık mühendisliği gereksinimlerini karşılamak üzere geliştirilmiştir (Xia ve ark., 2021). Bu özellikler, SMP'leri hem küçük hem de büyük ölçekli uzay uygulamalarında kullanıma son derece uygun kılmaktadır. Öne çıkan uygulama alanları arasında menteşeler, bom sistemleri, açılır/kapanır optik sistemler, aynalar, antenler, esnek yansıtıcılar, SMP köpükten üretilmiş açılır kapanır yapılar ve şekil değiştirebilen (morphing) yapılar yer almaktadır (Leng ve ark., 2009). Havacılık sistemlerinde SMP kullanımı, geleneksel mekanik bileşenlerin yerini alma potansiyeli sayesinde sistem ağırlığını azaltma, bakım gereksinimini düşürme ve yapısal uyarlabilirliği artırma avantajı sunmaktadır. Ayrıca, bu malzemelerin kontrollü şekil değiştirme yetenekleri, uzayda konuşlandırılabilir yapılar için güvenilir ve tekrarlanabilir bir çözüm sağlayarak hem görev verimliliğini hem de operasyonel ömrü artırmaktadır. Örnek olarak Şekil 2.5 SMP kompozit menteşenin açılma sürecini gösterilmektedir. Isıtma işlemi 30 saniye sürdükten sonra menteşenin sıcaklığı yaklaşık 80 °C'de sabit kalmaktadır. Tüm açılma süreci yaklaşık 100 saniye sürmektedir (Leng ve ark., 2011).



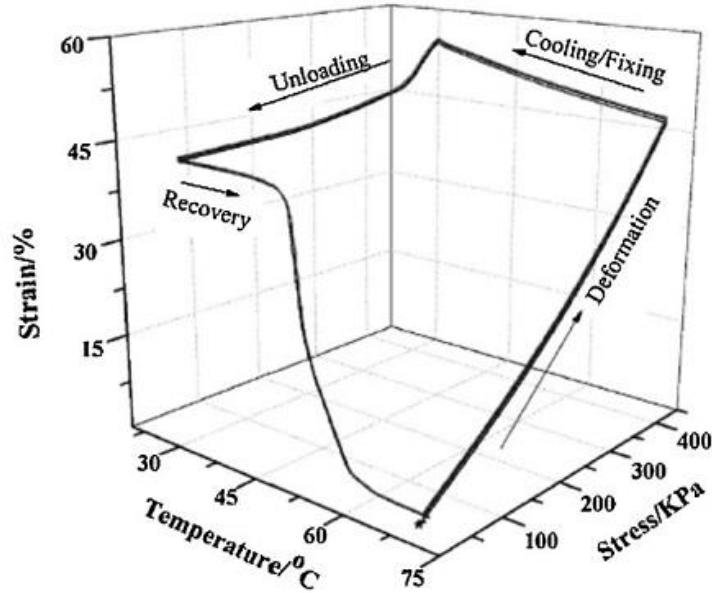
Şekil 2.5. SMP-kompozit menteşenin şekil geri kazanım süreci (Leng ve ark., 2011)

2.3.2 Şekil hafıza mekanizması

SMP'lerde orijinal kalıcı şeklin korunması, kalıcı konfigürasyonu stabilize eden ağ noktaları (netpoints) tarafından sağlanırken, yönetilirken, geri dönüşümlü şekil değişimi, geçici şekilden sorumlu anahtarlama alanları (switching domains) tarafından kontrol edilir (Dayyoub ve ark., 2022). Bu anahtarlama bölgelerindeki polimer zincirlerinin hareketliliği, amorf polimerlerde T_g ve yarı kristal polimerlerde T_m karşılık gelen T_{trans} tarafından belirlenir (Cao ve ark., 2020). SMP'ler T_{trans} değerinin üzerine ısıtıldığında, anahtarlama bölgelerindeki polimer zincirleri yüksek esneklik kazanır ve düşük gerilmeler altında büyük şekil değişimlerine uğrayabilmektedir. Malzeme T_{trans} değerinin altındaki bir sıcaklığa soğutulduğunda zincirler hareketsiz hale gelir ve böylece geçici şekil sabitlenmektedir. SMP'nin tekrar kalıcı şekline dönmesi için, malzeme yeniden T_{trans} değerinin üzerine ısıtılmalı ve böylece anahtarlama bölgelerindeki zincirler hareketlilik kazanarak kalıcı şekil konfigürasyonuna geri dönebilmelidir (Lendlein ve Kelch, 2002).

Polimerlerdeki şekil hafıza etkisi (SME), genellikle sıcaklık ve çekme gerilimine karşı çekme uzamasının grafiğe dökülmesiyle gösterilir; bu yöntem, dinamik mekanik analiz cihazı gibi kontrollü gerilme koşullarında karakterizasyon için oldukça uygundur. Şekil 2.6'da gösterildiği üzere, bir SMP termomekanik çevrimi dört aşamada tanımlanmaktadır. İlk olarak yüksek sıcaklıklarda uygulanan yük altındaki deformasyon

soğutma sırasında sabitlenebilir ve bu durum oda sıcaklığındaki boşaltma eğrisinde görülmektedir. Zincir hareketliliği camsılaşma, kristalleşme veya benzeri süreçlerle kısıtlandığında, uygulanan iş gizli gerinim enerjisi olarak depolanır (Şekil 2.6.). Şekil sabitleme (Şekil 2.6.), sabit gerilme altında soğutma sırasında gerçekleşmektedir. Genel olarak, sabitleme aşamasında gerilmenin serbest bırakılması, sabitlemenin derecesine bağlı olarak gerinimde hafif bir azalmaya yol açmaktadır (Şekil 2.6.). Daha sonra, geçiş sıcaklığının (T_g veya T_m) üzerine yeniden ısıtıldığında depolanan enerji açığa çıkar; polimer zincirleri serbest kaldıkça (Şekil 2.6.), malzeme çapraz bağlarla tanımlanmış olan orijinal şekline geri dönmektedir (Liu ve ark., 2007a).



Şekil 2.6. Şekil hafızalı bir polimer için şekil hafıza mekanizmasının 3 boyutlu çizimi (Serrano ve Ameer, 2012)

2.3.3 Epoksi reçine şekil hafızalı polimer

SMP'lerin bazı termoplastik ve termoset türleri şekil hafıza özellikleri göstermektedir. Termoplastik şekil hafızalı polimerler yüksek biyouyumluluk ve biyobozunurluk potansiyelleri nedeniyle tercih edilmektedir. Ayrıca, yumuşak ve sert alanların oranı ayarlanarak termoplastik şekil hafızalı polimerlerin özellikleri değiştirilebilmektedir. Termoset polimerler ise üstün termomekanik özelliklerin yanı sıra benzersiz şekil hafıza özellikleri gösterebilmeleri nedeniyle akıllı polimerler

sınıfında giderek önem kazanmaktadır. Epoksi reçineler termoset SMP 'lerden, araştırmacıların kullandığı yaygın polimer malzemedir (Song ve ark., 2011).

Epoksi reçineleri 1909'da Prileschajew tarafından keşfedilmiştir. Epoksi reçineler, birden fazla epoksi grubu içeren düşük molekül ağırlıklı ön polimerler olarak da tanımlanmaktadır (Jin ve ark., 2015). Epoksi reçineler, çeşitli kürlleme maddeleri kullanılarak oluşan reaksiyonlar sonucunda termoset yapılı ürün oluşturulmaktadır. Epoksi malzemelerin özellikleri, sentezde kullanılan epoksi reçinelerinin ve kürlleme maddelerinin türlerine göre değişiklik göstermektedir. Yapı ve özellikleri birbirinden farklı epoksi reçineleri çeşitli sektörlerde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Epoksi reçine türlerinden bazıları aşağıdaki verilmektedir.

- Diglisidil eter bisfenol A (DGEBA)
- Diglisidil eter bisfenol F (DGEBF)
- Novalak epoksi (NE)
- Diglisidil eter tris(hidroksifenil) metan
- N,N-diglisidil anilin (DGA)
- Triglisidil p-aminofenol (TGPAP)
- N,N,N',N'-tetraglisidil-4,4'-metilen dianilin (TGMDA)

Epoksi reçinelerinin büyük bir kısmı bisfenol A ve epiklorhidrin tepkimesiyle elde edilmektedir (Şekil 2.7). Epoksi reçinesi üretiminin ilk aşamasında epiklorhidrin fazla miktarda kullanılarak düşük mol kütleli bir ön polimer elde edilmektedir.

Epoksi reçineleri, çapraz bağlı termoset yapıları sayesinde SMP olarak kullanılmaya uygun malzemelerdir. Termal uyarana yanıt vererek geçici bir şekilden kalıcı şekle geri dönebilme yeteneği vardır. Bu epoksi reçinelerin şekil hafızası uygulamalarında kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Yüksek mekanik dayanım, kimyasal direnç, boyutsal kararlılık ve ısıl stabilite gibi özellikleri sayesinde epoksi bazlı SMP havacılık, otomotiv, elektronik ve yapısal mühendislik gibi alanlarda önemli uygulama potansiyeline sahiptir. Ancak, epoksilerin doğası gereği kırılğan ve sınırlı esnekliğe sahip olmaları, şekil hafızası performanslarını sınırlamakta ve epoksinin yaygın kullanımını kısıtlamaktadır (Almezgagi ve ark., 2025). Bu nedenle, dolgu maddeleri, plastikleştirici veya farklı sertleştirici ile modifikasyon yoluna gidilerek dayanıklılık, esneklik ve şekil geri kazanım performansları iyileştirilmeye çalışılmaktadır.

Epoksi kürlleme maddeleri, epoksi reçine kürlleme reaksiyonunu destek vermek veya çapraz bağlanmayı kontrol etmeyi sağlayan maddelerdir. Kürlleme işlemi sırasında epoksi reçinesinde oluşan reaksiyonlar sonucu geri dönüşü olmayan değişiklikler meydana gelmektedir. Epoksi reçinelerinin sertleşme kinetiği ve T_g 'si, sertleştirme maddelerinin moleküler yapısıyla ilgilidir. Sertleştirici maddeler, kimyasal bileşimlerine göre amin tipi sertleştiriciler, alkali sertleştiriciler, anhidritler ve katalitik sertleştiriciler olarak sınıflandırılmaktadır (Jin ve ark., 2015).

Epoksi reçine sertleştirme yöntemleri arasında oda sıcaklığında sertleşme, yüksek sıcaklıkta sertleşme ve elektromanyetik ısıma (mikro dalga yayınımları) ile sertleştirme bulunmaktadır. Epoksi reçine sertleştirmesinde farklı sertleştiriciler kullanılmaktadır. Oda sıcaklığında sertleştirme maddeleri, birincil, ikincil veya üçüncül alifatik aminler olabilen alifatik aminlerdir. Yüksek sıcaklıkta sertleştirme maddeleri ise aromatik aminlerdir. (Örneğin 4, 4 diaminodifenil sülfon ve anhidritler). Genel olarak, yüksek sıcaklıkta kürlenen reçine, daha düşük sıcaklıklarda veya oda sıcaklıklarında kürlenene göre daha yüksek camsı geçiş sıcaklığına ve kimyasal dirence sahip olduğu belirlenmiştir (Bello ve ark., 2015)

Epoksi reçineleri, kimyasal olarak kararlı ve çevresel bozulmaya karşı dirençli olmaları nedeniyle yüksek teknolojiye havacılık uygulamalarında kullanım yerleri gün geçtikçe çeşitlenmekte ve artmaktadır (Song ve ark., 2011). Şekil hafıza özelliklerinde önemli bir yere sahip olan termal geçiş sıcaklığı, farklı monomer veya dolgu maddeleri kullanılarak özel ihtiyaçlara göre değiştirilebilmektedir. Bu özellikler, epoksi bazlı polimerleri şekil hafızası çalışmalarında uygun bir araştırma materyali haline getirmektedir (Leng ve ark., 2009). Şekil hafızalı epoksi polimerler üstün mekanik özellikler, mükemmel boyutsal kararlılık, iyi yapışma özellikleri, iyi termal kararlılık ve iyi işleme özellikleri göstermektedir. Bu özellikleri nedeniyle birbirinden çok farklı uygulamalarda kullanımı giderek artmaktadır. SMP/SMPC'lerin kullanım alanlarından özellikle epoksi kompozit malzemeler, mükemmel şekil hafıza özellikleri, sertlik ve mukavemet göstermeleri nedeniyle verici, anten vb. havacılık ve uzay uygulamalarında, kendi kendini onarabilme özellikleri, 3D ve 4D baskı ile birleştirilmesinde yumuşak robotlar, esnek elektronikler ve tıbbi cihazlar için mükemmel fırsatlar sunmaktadır.

2.3.4 Sertleştiriciler

Sikloalifatik poliamin (Ipox EH-2041)

Düşük viskoziteli bir sikloalifatik poliamin sertleştiricidir. Epoksi gruplarıyla yüksek reaktivite göstererek, düşük sıcaklıklarda dahi etkili kürlleme sağlar. Bu sertleştirici, özellikle mekanik dayanımın yüksek olduğu, kimyasal direncin kritik olduğu uygulamalarda tercih edilmektedir. Ipox EH-2041 ile kürlenene sistemler, düşük sararma eğilimi ve iyi UV dayanımı gibi avantajlara sahiptir.

Metil-5-norbornen-2,3-dikarboksilik anhidrit (MNA)

Yaygın olarak kullanılan bir asidik anhidrit tipi sertleştiricidir. Termoset matrislerde yüksek ısı dayanımı, kimyasal direnç ve boyutsal kararlılık sağlaması nedeniyle özellikle kompozit uygulamalarında tercih edilmektedir. MNA, epoksi reçinelerle ısı altında reaksiyona girerek düzgün ve çapraz bağlı bir yapı oluşturur.

Sitrik asit

Üç fonksiyonel karboksilik asit grubuna sahip doğal bir organik asittir. Biyobozunur yapısı ve çevre dostu özellikleri sayesinde alternatif bir kürlleme ajanı olarak değerlendirilmektedir. Epoksi sistemlerinde düşük toksisiteye sahip çevreye duyarlı çözümler sunmak amacıyla kullanılmıştır. Sitrik asit, özellikle düşük sıcaklıkta kürlenene sistemler için uygundur. Sertleştiricilere ait temel özellikler Çizelge 2.1’de özetlenmiştir.

Çizelge 2.1. Epoksi reçine sistemlerinde kullanılan sertleştiricilerin bazı özellikleri

Sertleştirici	Kimyasal tip	Görünüm	Viskozite (25 °C)	Fonksiyonel gruplar	Kürleme şartları	Özellikler ve uygulama alanları
IpoX EH-2041	Sikloalifatik poliamin	Renksiz- açık sarı sıvı	300–600 mPa·s	Primer ve sekonder aminler	Oda sıcaklığı veya 60– 80 °C	Düşük viskozite, UV dayanımı, iyi mekanik özellikler Yüksek ısı ve kimyasal direnç, kompozitler için ideal
MNA	Asidik anhidrit	Beyaz- açık sarı sıvı	Sıvı	Anhidrit grupları	100– 160 °C	Doğal, çevre dostu, düşük toksikite, biyobozunur
Sitrik Asit	Organik karboksilik Asit	Beyaz kristal toz	Katı formda	3 karboksil, 1 hidroksil	100– 150 °C (reaktif katkı ile)	

2.3.5 Plastikleştirici

Polietilen glikol (PEG), zincir yapısında birden fazla eter (-C-O-C-) bağları ve uç gruplarında hidroksil (-OH) grupları içerir. Bu fonksiyonel gruplar, epoksi reçine sistemleriyle sınırlı düzeyde etkileşime girerek ağ yapısını bozmaz ancak zincirler arası hareketliliği artırır. Böylece, reçine sistemine esneklik, darbe dayanımı ve düşük sıcaklık performansı kazandırır.

PEG'in epoksi sistemine katkısı, sertliğin bir miktar azalması pahasına gevrekliğin azaltılması, gerilme-altında deformasyon kabiliyetinin artması ve çatlak ilerlemesinin yavaşlaması gibi önemli avantajlar sağlar. Bu özellikleri sayesinde PEG, kompozit malzemeler, kaplamalar ve biyomedikal uygulamalar gibi alanlarda plastikleştirici ajan olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır.

2.3.6 Dolgu maddeleri

Sepiyolit ($\text{Si}_{12}\text{O}_{30}\text{Mg}_8(\text{OH})_4(\text{OH}_2)_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$)

Sepiyolit, hidratlı magnezyum silikat yapısında, doğal olarak oluşan iğne şeklinde kristallerden oluşan kil bazlı bir mineraldir. Kanal yapısı sayesinde yüksek özgül yüzey alanı, su tutma kapasitesi ve adsorpsiyon kabiliyeti gösterir. Bu özellikleri sayesinde epoksi matris ile fiziksel etkileşim kurarak mekanik dayanım, termal stabilite ve viskozite kontrolü açısından katkı sağlar. Ayrıca düşük yoğunluğu sayesinde hafif kompozit yapıların elde edilmesine olanak tanır.

Kolemanit ($2\text{CaO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)

Kolemanit, bor içeriği yüksek doğal bir mineraldir. Özellikle alev geciktirici katkı olarak epoksi sistemlerinde yaygın şekilde kullanılır. Termal bozunma sırasında bor bileşikleri oluşturarak alev geciktirici katmanlar meydana getirir. Ayrıca kalsiyum içeriği nedeniyle seramik benzeri sertlik ve termal kararlılık sağlar. Kolemanit kompozit sistemlerde hem yanma direncini artırmak hem de maliyetleri düşürmek amacıyla tercih edilmektedir.

2.3.7 Hızlandırıcı

Hızlandırıcı genel olarak aromatik bir fenol çekirdeğine bağlı üç adet dimetilaminometil grubu içerir. Yapısında yer alan amin ve fenol grupları sayesinde hem bazik karakter gösterir hem de epoksi halkalarının açılmasını kolaylaştırarak amin türü sertleştiricilerle yapılan reaksiyonların hızını artırır. Özellikle oda sıcaklığında kürlenemeyen sistemlerde, düşük miktarlarda bile kullanımıyla kürlenme süresini ciddi şekilde azaltabilir.

Aynı zamanda, düşük uçuculuğu ve yüksek termal kararlılığı sayesinde, epoksi sisteminin genel özelliklerini olumsuz yönde etkilemeden çalışır. Bu hızlandırıcı

genellikle aminler (örneğin Ipox EH-2041) veya anhidrit bazlı sertleştiricilerle birlikte kullanılmaktadır.

2.3.8 Çözücü

Tetrahidrofuran (THF), düşük kaynama noktasına (66°C) ve iyi çözme kapasitesine sahip, polar aprotik bir organik çözücüdür. Epoksi sistemlerde özellikle polar maddelerin çözünmesini sağlamak, karışımın viskozitesini düşürmek ve işlenebilirliği artırmak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. THF, hem epoksi reçine hem de sitrik asit ile uyumlu olduğundan, karışımın homojenliğini sağlamakta ve sitrik asidin matris içerisinde etkili biçimde dağılmasına yardımcı olmaktadır. Ayrıca, kürlenme öncesi buharlaşarak sistemden uzaklaştığı için kürlenmiş son ürün üzerinde kalıcı bir etkisi bulunmamaktadır. Bu özelliği, THF'yi geçici, fakat kritik bir işlem yardımcısı hâline getirmektedir.

3 KAYNAK ARAŞTIRMASI

Önceki çalışmalarda, epoksi bazlı şekil hafızalı polimerlerin performansını artırmak amacıyla çeşitli katkı maddeleri ve kimyasal modifikasyon stratejileri kullanılmıştır. Örneğin, bir çalışmada bisfenol A'nın diglisidil eteri (DGEBA), tritiol (TMP), tetraallil amin (TAA) ve düşük oranlarda (%0,1–0,5) grafen oksit (GO) ya da metakrilat grupları ile fonksiyonlandırılmış grafen oksit (GOM) kullanılarak çiftli tiol-epoksi/tiol-en reaksiyonları yoluyla şekil hafızalı epoksi polimerler sentezlenmiştir. Bu çalışmada, GOM'un epoksi reçine ağına kovalent bağlarla entegre edilmesi sayesinde yük transferinin optimize edildiği ve bunun sonucunda Young modülünde (220 → 519 MPa), çekme dayanımında (46,3 → 69,2 MPa), darbe dayanımında (0,051 → 0,42 J/mm), torkta (0,008 → 0,031 Nm) ve camsı geçiş sıcaklığında (75 → 105 °C) anlamlı artışlar elde edildiği rapor edilmiştir. Ayrıca bükme testi sonuçlarına göre %97–100 arasında şekil sabitleme oranı ve %97–99,7 arasında termo-uyarılı şekil geri kazanım oranı gösterdiği belirtilmiştir. Bu bulgular, fonksiyonel katkı maddelerinin epoksi matrisine etkin entegrasyonunun, şekil hafızası performansını iyileştirmede etkili bir yaklaşım olduğunu ortaya koymaktadır (Romero-Zúñiga ve ark., 2022).

Epoksi şekil hafızalı polimerlerin (ESMP'ler) mekanik özelliklerini ve ısıl direncini şekil hafızası performansını etkilemeden etkili bir şekilde iyileştirmek, bu malzemelerin pratik uygulamalardaki kullanım potansiyelini artırmak açısından büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda yapılan bir çalışmada, modifiye edilmiş çok katmanlı karbon nanotüplerin (MWCNT) sentezlenerek ESMP'lerin kapsamlı özelliklerini artırmak üzere takviye malzeme olarak kullanıldığı bildirilmiştir. Sadece %0,1 ile %1 oranında epoksi-modifiye MWCNT ilavesiyle darbe dayanımında yaklaşık %289 ile %444, çekme dayanımında ise %112 ile %184 oranında artış sağlanmıştır. Karboksil gruplarıyla modifiye edilmiş veya modifiye edilmemiş MWCNT'lerin de etkileri incelenmiş, ancak bu tür katkıların, epoksi-modifiye MWCNT'ler kadar belirgin mekanik iyileştirme sağlamadığı gözlemlenmiştir. Termogravimetrik analiz (TGA) ve dinamik mekanik analiz (DMA) sonuçları, %1'den daha az oranlarda kullanılan modifiye MWCNT'lerin ESMP'lerin ısıl direncini büyük ölçüde artırabildiğini ortaya koymuştur. MWCNT ilavesi, şekil geri kazanım süresini bir miktar uzatmış olsa da, toplam geri kazanım süresi 1 dakikadan kısa kalmış ve geri kazanım oranı yaklaşık %100 gibi yüksek bir seviyede korunmuştur (Wang ve ark., 2021). Bu bulgular, düşük miktarlarda epoksi-

modifiye karbon nanotüp kullanımının, ESMP'lerin hem mekanik hem de termal performansını şekil hafızası işlevini bozmadan geliştirebildiğini göstermektedir.

Bu çalışmada, karbon dirençli ısıtıcı lifler ve epoksi matris esaslı şekil hafızalı polimer aktüatörler, uzay uygulamaları için geliştirilmiştir. Geliştirilen aktüatörlerin mekanik, termal ve elektriksel özelliklerinin yanı sıra, ortam ve vakum koşullarındaki dağıtım kinetikleri incelenmiştir. Şekil hafızalı polimer aktüatörlerin açılma enerjisel verimliliğini artırmaya yönelik olarak, içten radyatif ısıtma sağlayan alüminyum kaplama temelli bir yöntem önerilmiştir. Ayrıca, aktüatörlerin şekil geri kazanım sürecinin ilk aşamasında hareket algılama imkânı sağlayan yenilikçi bir teknik gösterilmiştir. Bu teknik, karbon liflerinin dirençli ısıtma özelliklerini ve açılma sırasında meydana gelen elektriksel direnç düşüşünü kullanmaktadır. Son olarak, şekil hafızalı polimer aktüatörlerin uzay ortamındaki dayanıklılık performansı ele alınarak değerlendirilmiştir (Margoy ve ark., 2021).

Nohales ve ark. (2011) çalışmasında Bisfenol A bazlı bir epoksi reçinesi, saf sepiyolit ve organik olarak yüzey modifiye edilmiş bir sepiyolit ile modifiye edilmiş ve iki farklı kürlenme maddesi olan alifatik ve sikloaromatik diamin kullanılarak termal olarak kürlenmiştir. Elde edilen nanokompozitler, DMA reoloji, TGA ve elektron mikroskobu teknikleriyle karakterize edilmiştir. Başlangıçtaki sepiyolit–epoksi karışımları, sepiyolit modifikasyonunun oluşturduğu perkolasyon ağı yapısıyla birlikte daha iyi bir dağılma göstermiştir. Mekanik özellikler de belirlenmiştir. Epoksi matrisin eğilme modülü, organofilik sepiyolit eklenmesiyle hafifçe artış göstermiştir. Alifatik diamin ile kürlenmiş sepiyolit modifiyeli reçinenin eğilme dayanımı %10 artarken, sikloaromatik diamin ile kürlenmiş sistemde bu değer, modifiye edilmemiş reçineye kıyasla daha düşük çıkmıştır. Elektron mikrografları, organofilik sepiyolit katkılı nanokompozitte epoksi matrise sepiyolit daha iyi dağılmış olduğunu ortaya koymuştur. Sepiyolit katkısı ile başlangıçtaki termal bozunma sıcaklığı önemli ölçüde değişmemiştir; ancak mekanik özellikler etkilenmiştir. Eğilme dayanımındaki azalma, sepiyolit modifiyesinin neden olduğu gerilme yığılmalarına (stress concentration) bağlanmıştır.

Kocaman ve ark. (2024) tarafından yapılan çalışmada, bor bakımından zengin bir mineral türü olan kolemanit dolgusu ile birlikte çeşitli alev geciktiriciler kullanılarak epoksi esaslı kompozitlerin alev geciktiricilik özelliklerinin artırılması amaçlanmıştır.

Alev geciktirici olarak alüminyum hidroksit ($\text{Al}(\text{OH})_3$) ve bor içeren bileşikler: boraks (BRX), doğal mineraller tinkal (TNC) ve kolemanit ile birlikte çalışmada sentezlenen baryum metaborat (BaMB) kullanılmıştır. Kompozitlerin ve katkı maddelerinin karakterizasyonu için SEM), X-ışını kırınımı (XRD), TGA, DSC, DMA, temas açısı (CA) ve partikül boyutu analizi yapılmıştır. Tüm bor bileşikleri, kompozitlerin termal kararlılığını artırmıştır. ER/kolemanit-BaMB kompoziti hariç, diğer kompozitlerin yüzey temas açıları 90° 'nin üzerinde ölçülmüştür. Yanma ve ısı özellikler açısından en iyi sonuçlar, kolemanit-BaMB- $\text{Al}(\text{OH})_3$ -TNC oranı 15:5:15:15 olan kompozitte elde edilmiştir. Bu kompozitin çekme dayanımı 96 MPa, kendi kendine sönme süresi 65 saniye, tahmini ve deneysel limit oksijen indeksi (LOI) değerleri ise sırasıyla %29,6 ve %25 olarak belirlenmiştir.

Li ve ark. (2023) tarafından yapılmış bu çalışmada, hidrojenlenmiş bisfenol A tipi epoksi reçine (AL-3040) ile diglisidil-4,5-epoksisikloheksan-1,2-dikarboksilat epoksi reçinesi (TDE-86) kullanılarak ikili bir şekil hafızalı epoksi reçine (SMEP) sistemi tasarlanmıştır. Ayrıca bu ikili reçine sistemi, vakum torbası altında gaz giderme kalıplama yöntemiyle şekil hafızalı karbon fiber takviyeli kompozitlerin (SMPC) üretiminde prepreg olarak kullanılmıştır. TDE-86 içeriği artırıldıkça SMEP sisteminin T_g , çekme dayanımı ve Young modülü belirgin şekilde artarken, darbe dayanımı azalmıştır. SMEP sistemi, 30 döngü sonrasında $>97,1\%$ şekil sabitleme oranı ve $>98,4\%$ şekil geri kazanım oranı ile iyi bir şekil hafızası performansı sergilemiştir. SMEP'in tüm şekil geri kazanım süreci 45 saniye içerisinde tamamlanabilmiştir. Saf SMEP'ye kıyasla, SMPC hem ortam sıcaklığında hem de düşük sıcaklıklarda mükemmel mekanik özellikler göstermiştir. SMPC'nin ortam sıcaklığındaki çekme dayanımı ve çekme modülü sırasıyla 626 MPa ve 38 GPa gibi değerlere ulaşmış, bu da SMEP'e göre sırasıyla 10 ve 30 kat daha yüksek olmuştur. Ayrıca şekil hafızası testleri, SMPC'nin şekil sabitleme ve geri kazanım oranlarının 30 döngü sonrasında her ikisinin de 95% 'in üzerinde olduğunu ortaya koymuştur. Karbon fiberlerin sağladığı daha yüksek geri kazanım kuvveti sayesinde, şekil hafızası süresi 29 saniyeye kadar kısalmıştır. Bu çalışmada geliştirilen SMPC'nin menteşeler, açılır paneller ve şekil değiştiren kanatlar gibi havacılık uygulamaları için oldukça umut verici olduğu görülmektedir.

Zheng ve ark. (2015) yaptıkları çalışmada, T_g 40°C ile 80°C arasında ayarlanabilir olan iki bileşenli bir epoksi-amin şekil hafızalı polimer sistemi rapor edilmiştir. Sistem, şekil sabitleme, şekil geri kazanım oranları ve döngüsel stabilite

açısından mükemmel şekil hafızası özellikleri sergilemektedir. Özellikle, T_g üzerindeki ve T_g sıcaklığında kopma uzaması değerleri sırasıyla %111 ve %212'ye ulaşmaktadır. Bu kadar yüksek gerilimli bir epoksi sisteminin şekil hafızalı cihaz uygulamaları için olanakları önemli ölçüde genişleteceğini öngörülmektedir.

Hu ve ark. (2017) yapmış oldukları çalışmada, epoksi ve aromatik amin sertleştirici kullanılarak yeni bir epoksi SMP hazırlanmıştır. Statik mekanik özellikleri elde etmek amacıyla tek eksenli çekme testleri ve dijital görüntü korelasyonu kullanılmıştır. Geri kazanım prosesindeki ısıya karşılık gelen camsı geçiş sıcaklıklarını değerlendirmek amacıyla dinamik mekanik analiz gerçekleştirilmiştir. 37,4 °C'de başlayan camsı geçiş sıcaklığı, elektrikli ısıtıcılarla etkin bir şekilde sağlanabilmiş ve böylece epoksi SMP'lerin şekil hafızası özellikleri doğrulanmıştır. Genel olarak, bu çalışma epoksi SMP'lerin temel mekanik özellikleri ve davranışları hakkında faydalı gözlemler sunmaktadır.

Kompozit, stiren bazlı bir şekil hafızalı reçine kullanılarak ve hibrit dolgu maddesi karbon siyahı ve kısa karbon fiber ilavesi ile sentezlenmiştir. DSC ölçümleri sonucunda, %5,5 hibrit dolgu maddesi içeren kompozitin T_g 46,38 °C'den 57,28 °C'ye yükselmiştir. Son olarak, 28 V doğru akım devresi uygulanan bir geri kazanım testinde, numunelerin sıcaklık dağılımı ve şekil geri kazanım davranışı kızılötesi video ile kaydedilmiştir. Şekil geri kazanımı elektrikle aktive edilen şekil hafızalı polimere karbon siyahı ve kısa karbon fiberlerin entegre edilmesinin etkinliği ortaya koymuştur. Bu hibrit dolgular, SMP'nin mekanik ve iletkenlik özelliklerini iyileştirmek amacıyla araştırılmıştır (Lu ve ark., 2010).

Kim ve ark. (2021) DGEBA tipi bir epoksi reçine ve trietilentetramin (TETA) sertleştirici kullanılarak SMP numunesi hazırlamıştır. Çalışmanın amacı, optimize edilmiş SMP kompozitlerini belirlemek ve dolgu türü ile sertleştirici miktarına bağlı olarak şekil hafızası performansı ile fiziksel özellikleri incelemektir. Şekil hafızalı kompozit, grafit gibi nanokarbon malzemeleri ve Cu gibi karbon içermeyen katkı maddeleri ilave edilerek üretilmiştir. Dolgu türü ve içeriğine bağlı olarak şekil geri kazanım mekanizması karşılaştırılmış; şekil sabitleme ve geri kazanım özellikleri analiz edilmiştir. Ayrıca, kompozitin fiziksel özellikleri mekanik dayanım, ısı iletkenlik ve DSC analizleri ile değerlendirilmiştir.

Wu ve ark. (2016) yeni bir epoksi reçine türü olan 9,9-bis [4-(2-hidroksietoksi) fenil] florinin diglisidil eteri (DGEBEF) başarıyla sentezlemiş ve proton nükleer manyetik rezonans spektroskopisi ($^1\text{H-NMR}$), FT-IR ve alan desorpsiyon kütle spektrometrisi (FDMS) analizleri ile karakterize etmiştir. DGEBEF'in 4,4'-diaminodifenil sülfon (DDS) ile kürlenmesinin kinetiği, izotermal olmayan DSC ile araştırılmış; kürlenmiş reçinenin termal kararlılığı ise TGA ile belirlenmiştir. DGEBEF/DDS sistemi; mükemmel işlenebilirlik, mekanik dayanım, tokluk, yüksek termal kararlılık ve düşük su absorpsiyonu gibi üstün özellikler sergilemektedir. Kürlenmiş epoksinin T_g , DMA ile $170\text{ }^\circ\text{C}$ olarak tespit edilmiştir. Kürlenmiş reçinenin camsı halindeki depolama modülünün kauçuk halindeki modülüne oranı yaklaşık 400 olup, bu sistemin şekil hafızalı malzeme olarak potansiyel uygulamalarına işaret etmektedir. Katla-aç şekil hafıza ve çekme-büzülme testleri ile mükemmel şekil hafıza özellikleri doğrulanmıştır. Katla-aç testinde şekil sabitleme oranı %99, şekil geri kazanım oranı ise $185\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 30 saniyelik geri kazanım süresinden sonra yaklaşık %100 olarak ölçülmüştür. Çekme-büzülme testinde, %25 gerinim ve $185\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta geri kazanım gerilimi 2,5 MPa olarak bulunmuştur. Her iki testte de şekil sabitleme ve geri kazanım oranları altı çevrim boyunca yaklaşık %99 seviyesinde korunmuştur.

Wei ve ark. (2012) tarafından yapılan çalışmada yeni bir şekil hafızalı hidro-epoksi reçine sisteminin termomekanik özellikleri ve şekil hafızası performansı incelenmiştir. Sistem; hidro-epoksi, maleik anhidrit ve poli(propilen glikol) diglisidil eter (PPGDGE) kullanılarak hazırlanmıştır. T_g , DMA yöntemiyle belirlenmiş ve sonuçlar, PPGDGE içeriği arttıkça T_g 'nin doğrusal olarak $124\text{ }^\circ\text{C}$ 'den $60\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye düştüğünü göstermiştir. Çekme dayanımı, PPGDGE'nin eklenmesiyle keskin şekilde artarken, PPGDGE oranı artmaya devam ettikçe kademeli olarak azalmıştır. Oda sıcaklığındaki eğilme dayanımı, PPGDGE içeriği arttıkça azalmış; ancak içerik %6,67 mol'e ulaştığında hafifçe artmış ve ardından yeniden azalmaya devam etmiştir. Benzer şekilde, oda sıcaklığındaki kopma uzaması, PPGDGE içeriğiyle artmış; ancak %6,67 mol PPGDGE seviyesinde hafif bir azalma göstermiş ve sonrasında yeniden artmaya devam etmiştir. Bu davranışlar, hidro-epoksi reçinenin sertliğini artıran esnek segment kristalleşmesine atfedilmiştir. Son olarak, reçinenin şekil hafızası davranışının incelenmesi, sıcaklık T_g veya üzeri olduğunda tam şekil geri kazanımının yalnızca birkaç dakika içinde gerçekleştiğini ortaya koymuştur. Şekil geri kazanım süresi, T_g , $T_g+10\text{ }^\circ\text{C}$ ve $T_g+20\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıklarında PPGDGE içeriği arttıkça önce artmış, ardından azalmış ve

bu değişim %6,67 mol PPGDGE içeriğinde bir zirve değere ulaşmıştır. Bu sonuçlar, PPGDGE içeriğinin artmasına bağlı olarak açıklanmıştır.

Liu ve ark. (2010) uzayda açılabilir yapılar da kullanılmak üzere, epoksi ve değişen oranlarda aromatik amin sertleştirici kullanılarak bir dizi SMEP hazırlamıştır. SMEP'lerin termal ve mekanik özellikleri; DSC, DMA ve çekme testi ile incelenmiştir. şekil hafızası özellikleri ise "katla-a şekil hafıza testi" olarak adlandırılan alışılmadık bir yöntemle değerlendirilmiştir. şekil hafızası özellikleri üzerindeki çapraz bağ yoğunluğu, geri kazanım sıcaklığı ve ardışık çevrimlerin etkileri, bu faktörlerin sistematik olarak değiştirilmesiyle ortaya konmuştur. Sonuçlar, bu SMEP serisinin yüksek şekil koruma oranına (%99,5'ten fazla) ve neredeyse tam şekil geri kazanım oranına (%100 civarında) sahip olduğunu göstermiştir. T_g 44,7 °C ile 145,3 °C arasında değişmekte olup, bu reçinelerin kullanıcı ihtiyaçlarına göre seçilmesine olanak tanımaktadır.

Song ve ark. (2011) SMP, E-51 tipi epoksi reçinesi ile farklı oranlarda kullanılan iki farklı sertleştirici 4,4'-metilendi-anilin (DDM) ve m-fenilendiamin (m-PDA) kullanılarak hazırlamıştır. Farklı sertleştirici türleri ve oranları ile çeşitli şekil hafızalı epoksi sistemleri sentezlenmiştir. Üretilen numunelerin şekil hafıza davranışları ve termomekanik özelliklerini incelemek amacıyla termal dondurma/geri kazanım testleri, DSC ve DMA yöntemleri uygulanmıştır. Sonuçlar, şekil hafızalı epoksi sistemlerinin termomekanik özellikleri ve kritik şekil dönüşüm sıcaklıklarının, kullanılan sertleştiricilerin tür ve oranlarının değiştirilmesiyle ayarlanabildiğini göstermektedir. Bununla birlikte, bu çalışmada hazırlanan tüm numunelerin ideal şekil hafızası etkisi sergilediği belirtilmiştir.

Wei ve ark. (2013) yaptıkları çalışmanın amacı, bir hidro-epoksi reçine sisteminde moleküler yapı ile şekil hafızası özelliği arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktır. Sistem, hidro-epoksi, menthan diamine (MDA) ve farklı moleküler ağırlıklardaki poli(propilen glikol) diglisidil eter (PPGDGE) kullanılarak hazırlanmıştır. PPGDGE içeriği sabit tutulurken, PPGDGE'nin moleküler ağırlığı değiştirilerek şekil hafızalı hidro-epoksi sisteminin çapraz bağ yoğunluğu ayarlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, çapraz bağ yoğunluğu azaldıkça T_g ve young modülü (E_r) de azalmaktadır. şekil geri kazanım oranı (R_r) üzerinde çapraz bağ yoğunluğunun önemli bir etkisi bulunmazken, T_g veya daha yüksek sıcaklıklarda birkaç dakika içinde tam geri kazanım

gözlemlenmiştir. Ancak, çapraz bağ yoğunluğu şekil sabitleme oranı (R_f) üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir. Çapraz bağ yoğunluğu çok düşük olduğunda, şekil hafızalı hidro-epoksi reçinesinin şekil sabitleme oranı %100'e ulaşamamaktadır.

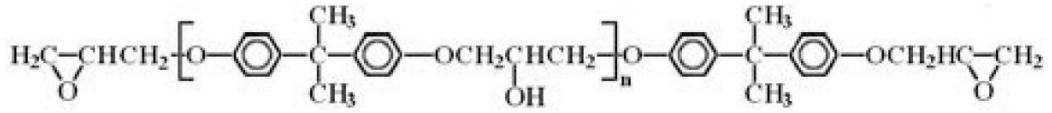
Kaynak araştırmasından da görülebileceği gibi çevresel sorunların artması, teknolojik gelişmeler ve oluşan ihtiyaç nedeniyle bu alandaki araştırmalarda artış yaşanmıştır. Farklı epoksi reçine, farklı sertleştiriciler ve farklı dolgu maddelerinin değerlendirilmesi üzerine yapılan çalışmalar da artmıştır. Sepiyolit ve kolemanit daha önce epoksi içeren malzemelerde mekanik ve alev geciktirici madde olarak kullanılmıştır. Bu özelliklerinin şekil hafıza özelliklerini de geliştireceği düşünülmektedir. Bu çalışmada sepiyolit ve kolemanitin farklı içerikli epoksi reçinelerde şekil hafıza özellikleri üzerine etkisi ve dolgu maddesi olarak kullanımı araştırılmıştır. Bu dolgu maddelerinin elde edilen kompozit malzemelerin fiziko-mekanik ve termal özelliklerine etkisi incelenmiştir.

4 MATERYAL VE YÖNTEM

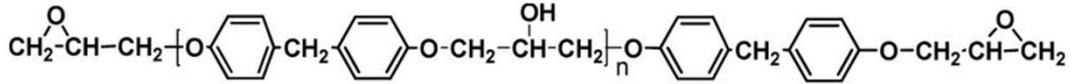
4.1 Materyal

4.1.1 Epoksi reçineleri

Bu çalışmada, polimer matrisi olarak iki farklı tipte epoksi reçine (ER); bisfenol A esaslı (NPEL 128) epoksi reçinesi ve bisfenol F esaslı (NPEF 170) epoksi reçinesi kullanılmıştır. Her iki reçine de Konuray Kimya firmasından temin edilmiş olup, ilave bir saflaştırma işlemine tabi tutulmadan doğrudan kullanılmıştır. NPEL 128'in molekül yapısı Şekil 4.1'de, özellikleri Çizelge 4.1'de, NPEF 170'in molekül yapısı Şekil 4.2'de, özellikleri ise Çizelge 4.2'de verilmiştir



Şekil 4.1. Bisfenol A'nın molekül yapısı – NPEL 128



Şekil 4.2. Bisfenol F'nin molekül yapısı – NPEF 170

Çizelge 4.1. NPEL 128 'in özellikleri

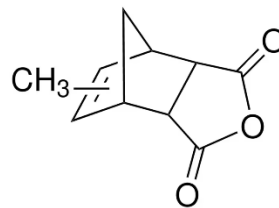
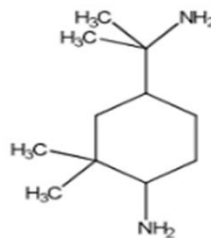
Özellik	Değer
Görünüm	Şeffaf ile açık sarı sıvı
Viskozite (25 °C'de)	12,000–15,000 cps
Epoksi eşdeğer ağırlığı (EEW)	184–190 g/eq
Yoğunluk (25 °C'de)	1,16 g/cm ³
Parlama noktası	>150 °C
Moleküler yapı	Bisfenol A'nın diglisidil eteri

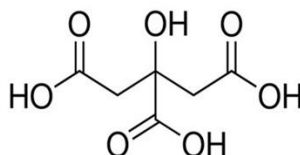
Çizelge 4.2. NPEF 170'in özellikleri

Özellik	Değer
Görünüm	Şeffaf ile açık sarı sıvı
Viskozite (25 °C'de)	2,000–5,000 cps
Epoksi eşdeğer ağırlığı (EEW)	160–180 g/eq
Yoğunluk (25 °C'de)	1,18 g/cm ³
Parlama noktası	>150 °C
Moleküler yapı	Bisfenol F'nin diglisidil eteri

4.1.2 Sertleştiriciler

Bu çalışmada üç farklı tipte epoksi reçine sertleştiricisi; sikloalifatik poliamin bazlı bir amin sertleştirici (Ipox EH-2041), asidik anhidrit tipi bir sertleştirici olan metil-5-norbornen-2,3-dikarboksilik anhidrit (MNA) ve doğal kaynaklı, çevre dostu bir sertleştirici olarak sitrik asit (SA) kullanılmıştır. Tüm sertleştiriciler Sigma-Aldrich ve Konuray Kimya'dan temin edilmiş olup herhangi bir ilave saflaştırma işlemine tabi tutulmadan kullanılmıştır. MNA, sikloalifatik poliamin ve SA sertleştiricilerinin molekül yapıları Şekil 4.3- Şekil 4.5'te sırasıyla gösterilmişlerdir.

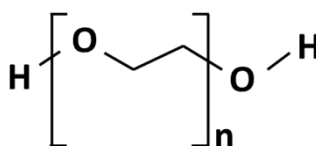
**Şekil 4.3.** MNA'nın molekül yapısı**Şekil 4.4.** Sikloalifatik poliaminin molekül yapısı



Şekil 4.5. SA'in molekül yapısı

4.1.3 Plastikleştirici

Bu çalışmada epoksi sistemlerinin esneklik ve tokluk özelliklerini iyileştirmek amacıyla plastikleştirici olarak PEG kullanılmıştır. Kullanılan PEG, ortalama moleküler ağırlığı 380–420 g/mol olan düşük molekül ağırlıklı, PEG dir. PEG Sigma-Aldrich firmasından temin edilmiş ve herhangi bir ön işleme tabi tutulmadan doğrudan kullanılmıştır. PEG'in molekül yapısı Şekil 4.6'da gösterilmiştir ve özellikleri Çizelge 4.3'te sunulmuştur.



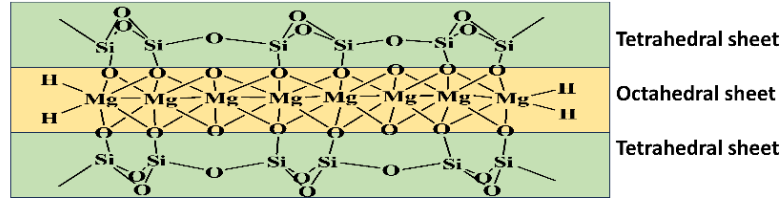
Şekil 4.6. PEG'in molekül yapısı

Çizelge 4.3. PEG'in özellikleri

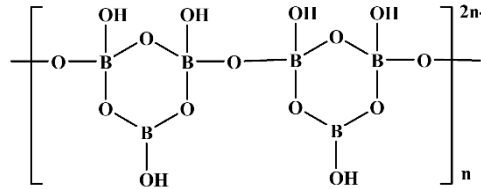
Özellik	Değer
Görünüm	Renksiz, viskoz sıvı
Moleküler ağırlık (ortalama)	380–420 g/mol
Yoğunluk (25 °C)	~1,13 g/cm³
Hidroksil sayısı	2 (uç gruplarda)
Suda çözünürlük	Yüksek

4.1.4 Dolgu maddeleri

Bu çalışmada, epoksi esaslı kompozitlerin mekanik, ısı ve alev geciktirici özelliklerini geliştirmek amacıyla inorganik dolgu maddeleri olarak sepiyolit ve kolemanit kullanılmıştır. Her iki dolgu maddesi de Türkiye’den; sepiyolit, Eskişehir bölgesinden, kolemanit ise Eti Maden İşletmeleri (Türkiye Bor Enstitüsü)’den temin edilmiştir. Malzemeler doğrudan kullanılmış olup, herhangi bir yüzey modifikasyonu ya da saflaştırma işlemine tabi tutulmamıştır. Sepiyolit ve kolemanitin molekül yapıları Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de sırasıyla gösterilmiştir. Sepiyolit ve kolemanit dolgu maddelerine ait özellikler Çizelge 4.4’te sunulmuştur.



Şekil 4.7. Sepiyolit molekül yapısı



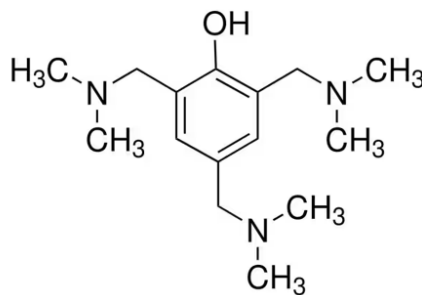
Şekil 4.8. Kolemanitin molekül yapısı

Çizelge 4.4. Sepiyolit ve kolemanit dolgu maddelerinin özellikleri

Özellik	Sepiyolit	Kolemanit
Kimyasal formül	$\text{Si}_{112}\text{O}_{360}\text{Mg}_8(\text{OH})_4(\text{OH}_2)_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	$2\text{CaO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Görünüm	Gri- beyaz toz	Beyaz- açık sarı kristal
Yoğunluk	$\sim 2,0 \text{ g/cm}^3$	$\sim 2,4 \text{ g/cm}^3$
Partikül boyutu	$< 20 \mu\text{m}$	$< 50 \mu\text{m}$
Fonksiyon	Mekanik ve termal güçlendirme	Alev geciktirme, termal stabilite
Kaynak	Eskişehir, Türkiye	Eti Maden, Türkiye

4.1.5 Hızlandırıcı

Bu çalışmada, epoksi reçine ile sertleştirici arasındaki reaksiyon hızını artırmak ve kürlenme süresini kısaltmak amacıyla 2,4,6-tris(dimethylaminomethyl)phenol hızlandırıcı olarak kullanılmıştır. Hızlandırıcı Sigma-Aldrich firmasından temin edilmiş olup, doğrudan kullanılmıştır. Hızlandırıcının molekül yapısı Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Çizelge 4.5'te bu hızlandırıcının özellikleri sunulmuştur.



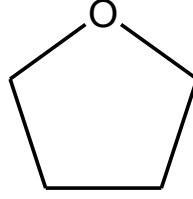
Şekil 4.9. Hızlandırıcının molekül yapısı

Çizelge 4.5. Hızlandırıcının özellikleri

Özellik	Değer
Kimyasal Formül	C ₁₅ H ₂₇ N ₃ O
Moleküler Ağırlık	265,40 g/mol
Görünüm	Açık sarı, viskoz sıvı
Yoğunluk (25 °C)	~0,98 g/cm ³
Kaynama Noktası	~280 °C
Fonksiyonel Gruplar	Fenol, üç adet tersiyer amin grubu
Görev	Kürlenme hızlandırıcısı

4.1.6 Çözücü

Bu çalışmada, sitrik asidin epoksi reçine sistemi ile daha homojen bir şekilde dağılmasını ve reaksiyona girebilirliğini artırmak amacıyla tetrahidrofuran (THF) çözücü olarak kullanılmıştır. THF, Sigma-Aldrich firmasından temin edilmiş olup, herhangi bir saflaştırma işlemi uygulanmadan kullanılmıştır. THF'in molekül yapısı Şekil 4.10'da gösterilmiştir. THF'in temel özellikleri Çizelge 4.6'da özetlenmiştir.



Şekil 4.10. THF'in molekül yapısı

Çizelge 4.6. THF'in özellikleri

Özellik	Değer
Kimyasal Formül	C_4H_8O
Moleküler Ağırlık	72,11 g/mol
Kaynama Noktası	66 °C
Yoğunluk (25 °C)	0,889 g/cm ³
Çözünürlük	Su ve çoğu organik çözücüyle karışabilir
Görev	Sitrik asidin çözülmesi ve dağıtılması

4.2 Kullanılan Cihazlar

Ultrasonik banyo

Bu çalışmada, ER'nin zincir hareketliliğini sağlayarak dolgu maddeleri ile etkileşimini arttırmak amacıyla ultrasonik banyo kullanılmıştır. Ultrasonik banyo, yüksek frekanslı ses dalgaları (ultra ses) üreterek sıvı ortamda kabarcık patlaması olayı oluşturan bir cihazdır. Bu etki, mikroskobik hava kabarcıklarının oluşup patlamasıyla, karışımda yoğun yerel enerji boşalımı meydana getirir. Böylece, partiküllerin aglomerasyon eğilimi azaltılır, dispersiyon kalitesi artırılır ve karışım homojenliği sağlanmaktadır.

Analitik terazi

Bu çalışmada, deneysel malzemelerin hassas miktarlarda tartılması amacıyla analitik terazi kullanılmıştır. Kullanılan cihaz, 0,1 mg (0,0001 g) hassasiyetle ölçüm yapabilen, dijital göstergeli, bir analitik terazidir. Tüm malzemeler tartılmadan önce kuru ve temiz terazide, oda sıcaklığına dengelenmiş hâlde ölçülmüş, dış etkenlerin (hava

akımı, titreşim, nem) etkisini azaltmak için koruyucu cam kabin içinde tartım işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Etüv

Bu çalışmada, hazırlanan numunelerin kürlleme işlemleri ve bazı bileşenlerin ön kurutma işlemleri için etüv kullanılmıştır. Etüv, belirli ve sabit sıcaklıklarda kontrollü bir ortam sağlayarak, sıcaklıkla aktive olan kimyasal reaksiyonların kontrollü şekilde gerçekleşmesini mümkün kılmaktadır. Ayrıca, dolgu maddelerinin (örneğin sepiyolit, kolemanit) nem içeriğinin giderilmesinde de önemli rol oynamaktadır.

Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR)

Bu çalışmada, epoksi reçine sisteminin kimyasal yapısını ve bileşenler arası etkileşimleri incelemek amacıyla FT-IR analizi gerçekleştirilmiştir.

Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Bu çalışmada, hazırlanan epoksi kompozit numunelerin mikroyapısal morfolojisini, dolgu maddelerinin dağılımını ve matris-dolgu arayüzey etkileşimlerini incelemek amacıyla SEM kullanılmıştır. SEM, yüksek çözünürlüklü görüntüleme sağlayarak malzemelerin yüzey topografisi ve mikroyapısal özellikleri hakkında detaylı bilgi sunan gelişmiş bir analiz tekniğidir.

Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX)

Bu çalışmada, epoksi kompozit sistemlerinde kullanılan inorganik dolgu maddelerinin (sepiyolit ve kolemanit) kimyasal bileşimini doğrulamak ve yüzeydeki elementel dağılımı analiz etmek amacıyla Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDX) kullanılmıştır. EDX, SEM ile birlikte çalışan bir teknik olup, numunenin yüzeyine

gönderilen elektronların etkileşimi sonucu ortaya çıkan karakteristik X-ışınlarının enerji seviyelerine göre elementlerin tanımlanmasını sağlamaktadır.

Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC)

Bu çalışmada, hazırlanan epoksi esaslı numunelerin termal geçiş özelliklerini (özellikle T_g) belirlemek amacıyla DSC cihazı kullanılmıştır. DSC, bir malzemenin sıcaklıkla birlikte gösterdiği endotermik veya ekzotermik tepkileri ölçerek, ısıl davranışlarının analiz edilmesini sağlayan bir tekniktir.

Çekme-kopma test cihazı (Universal Test Machine – UTM)

Bu çalışmada, hazırlanan epoksi esaslı numunelerin mekanik performansını, özellikle çekme dayanımı, kopma uzaması ve elastik modül gibi temel özelliklerini belirlemek amacıyla çekme-kopma testi uygulanmıştır. Bu testler, bilgisayar kontrollü bir evrensel malzeme test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Çekme-kopma test cihazı Şekil 4.11'de gösterilmiştir.



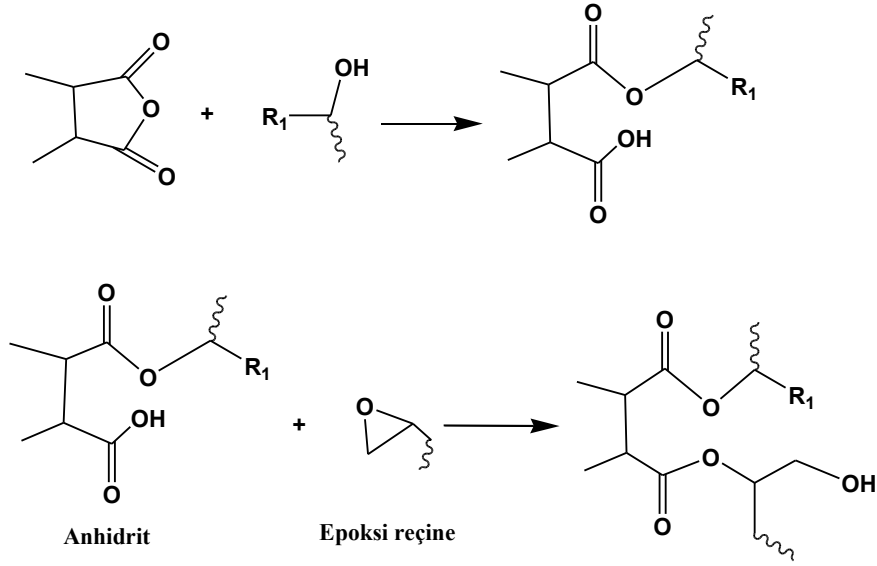
Şekil 4.11. Üniversal çekme-kopma test cihazı

4.3 Kompozitlerin Hazırlanması

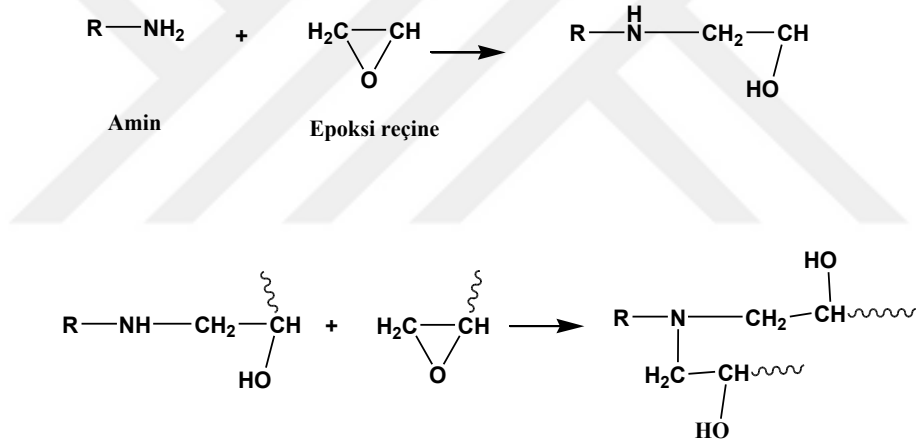
4.3.1 MNA ve sikloalifatik poliamin sertleştirici içeren kompozitler

Kompozitlerin hazırlanması literatürde belirtilen yöntemle göre (Guzel ve ark., 2016) yapılmıştır. Kompozitlerin hazırlanmasında iki farklı epoksi reçine (NPEF 170 ve NPEL 128) ve iki farklı dolgu madde (sepiyolit ve kolemanit) kullanılmıştır. İlk olarak dolgu maddelerin neminin uzaklaştırılması etüvde yapılmıştır. Daha sonra farklı dolgu maddeleri %1, %3, %5 ve %10 ağırlık oranlarında saf epoksilere eklenmiştir. Dolgu maddeleri ve epoksi reçine zincirleri arasındaki etkileşimleri artırmak amacıyla ultrasonik banyo içerisinde 20 dakika süreyle ultrasonik karıştırma uygulanmıştır. Ardından, bu karışıma %10 oranında PEG eklenmiştir. Elde edilen karışım tekrar ultrasonik banyoda karıştırılmıştır. Daha sonra (w/w) %30 MNA sertleştirici karışıma eklenmiştir. Karışımlar tekrar 15 dakika ultrasonik banyoda karıştırılmıştır. Hızlandırıcı ilave edildikten sonra karışımlar tekrar karıştırılmıştır. Elde edilen karışımlar, ASTM D 638 standardına uygun kalıplara dökülmüş ve hava kabarcıklarının giderilmesi amacıyla oda sıcaklığında 30 dakika bekletilmiştir. Ardından etüvde 12 saat boyunca 60 °C’de kürleme, sonrasında ise 120 °C’de 12 saatlik post-kürleme işlemine tabi tutulup kompozitler hazırlanmıştır.

Ayrıca, aynı prosedür kullanılarak %25 ağırlık oranında sikloalifatik poliamin içeren kompozit malzemeler de elde edilmiştir. Hazırlanan karışımlar, kalıplara döküldükten sonra 4 saat boyunca 40 °C’de bekletilmiş, ardından 4 saat süreyle 80 °C’de post-kürleme işlemine tabi tutulmuştur. Epoksi reçinesi ile anhidrit ve amin yapılı sertleştiriciler arasındaki kimyasal reaksiyon Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’te sırasıyla gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Epoksi ile anhidrit reaksiyonu



Şekil 4.13. Epoksi ile amin reaksiyonu

4.3.2 Sitrik asit sertleştirici kullanılarak

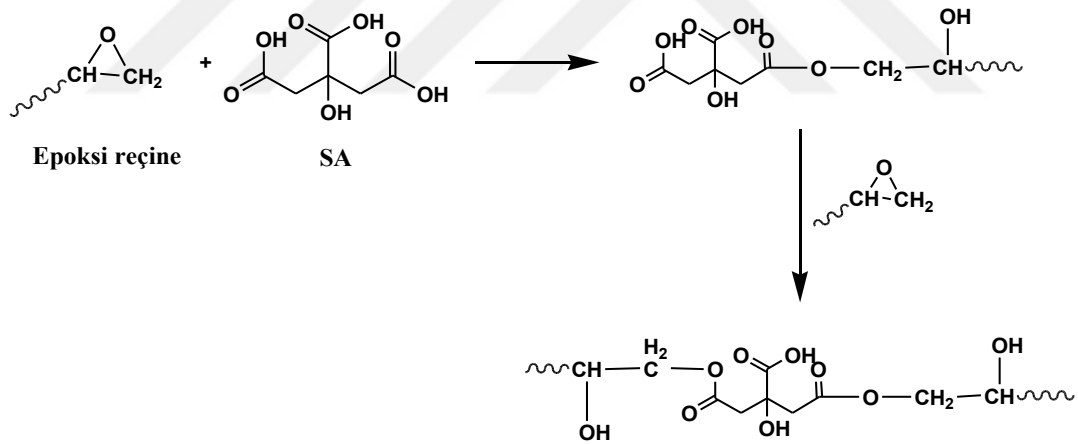
Epoksi reçine NPEL 128 ile farklı sitrik asit oranları (ağırlıkça %18,25, 20, 25 ve 30) kullanılarak kompozitler elde edilmiştir. İlk olarak SA 10 ml tetrahidrofuran (THF) içerisinde çözülmüştür. THF, düşük kaynama noktası (66°C) ve iyi çözünürlük özellikleri nedeniyle araştırmacılar tarafından yaygın olarak tercih edilmektedir (Sahoo ve ark., 2018). Bu karışım sitrik asidin tamamen çözünmesi sağlanana kadar sürekli olarak karıştırılmıştır. Daha homojen bir kompozit elde etmek için karışım mekanik karıştırmaya ek olarak ultrasonik banyo yöntemiyle karıştırılmıştır. Daha sonra, bu

karışıma epoksi eklenmiştir. Tüm karışım 70–80°C sıcaklıkta, THF tamamen buharlaşana ve viskoz bir karışım oluşana kadar yeniden karıştırılmıştır. Bu işlemin ardından, elde edilen reçine karışımı, uygun boyutlara sahip bir kalıba dökülerek, 2 saat 40°C’de süreyle kürlenmiş, ardından 60°C’de 2 saat, 90°C’de 2 saat, ve 120°C’de 2 saatlik bir son kürleme işlemine tabi tutulmuştur. Hazırlanan numuneler ASTM D 638 standartlarına uygun olarak elde edilmiştir.

İkinci aşamasında %25 sertleştirici oranına farklı oranlarda (ağırlıkça %5, 10, 15 ve 20) PEG eklenerek kompozitleri hazırlanmıştır.

Üçüncü aşamasında ise, kolemanit kompozitleri ve sepiyolit kompozitleri aynı deneysel prosedür uygulanarak hazırlanmıştır. Ağırlıkça %1, 3, 5, ve 10 oranında dolgu maddesi ve ağırlıkça %10 oranında PEG kullanılarak kompozitleri elde edilmiştir.

Aynı prosedürü takiben farklı epoksi reçine NPEF 170 kullanılarak kompozit malzemeleri elde edilmiştir. PEG’in oranı ise %5 olarak kullanılmıştır. Epoksi reçinesi ile sitrik asit sertleştirici arasındaki kimyasal reaksiyon Şekil 4.14’te verilmiştir.



Şekil 4.14. Epoksi ile sitrik asit reaksiyonu

Hazırlanan epoksi kompozit formülasyonlarının adlandırılmasını basitleştirmek amacıyla, bu çalışmada bir kodlama sistemi kullanılmıştır. Her bir numune R1, R2, M, A, SA, Px_y, Sy, Kz şeklinde gösterilmiştir. Burada R1, NPEF 170 epoksi reçinesini; R2, NPEL 128 epoksi reçinesini; M, sertleştirici olarak kullanılan MNA’yı; A, sertleştirici olarak kullanılan sikloalifatik poliamin’i; SA, sertleştirici olarak kullanılan sitrik asit’i;

Px, x ağırlık yüzdesinde plastikleştirici olarak kullanılan PEG; Sy, y ağırlık yüzdesinde dolgu maddesi olarak kullanılan sepiyoliti; Kz ise z ağırlık yüzdesinde dolgu maddesi olarak kullanılan kolemaniti ifade etmektedir. Tüm bileşen oranları ağırlıkça yüzde (w/w%) cinsinden verilmiştir. MNA ile sertleştirilen NPEF 170 ve NPEL 128 epoksi reçinelerin kompozitleri için sırasıyla R1MPxSyKz ve R2MPxSyKz, sikloalifatik poliamin ile sertleştirilen NPEF 170 ve NPEL 128 epoksi reçinelerin kompozitleri için sırasıyla R1APxSyKz ve R2APxSyKz ve sitrik asit ile sertleştirilen NPEF 170 ve NPEL 128 epoksi reçinelerin kompozitleri için ise sırasıyla R1SAPxSyKz ve R2SAPxSyKz kodlar kullanılmıştır.

4.4 Karakterizasyonlar

4.4.1 FT-IR analizi

Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR), polimerizasyon sürecinde bağ dönüşümünü değerlendirmede son derece etkili bir analitik tekniktir. FT-IR elektromanyetik spektrumun kızılötesi bölgesinde çalışır ve moleküler titreşimler hakkında ayrıntılı bilgi sağlayarak kimyasal yapı ve bağ özelliklerinin aydınlatılmasına imkân tanır. Kızılötesi soğurma, bir titreşim modunun moleküler dipol momentinde değişime yol açması durumunda gerçekleşir; bu durum ya elektronegativite farklılıklarından kaynaklanan kalıcı dipoller aracılığıyla ya da asimetrik gerilme ve bükülme hareketleriyle meydana gelir. Bu titreşimlerin özgül enerji gereksinimleri, kimyasal bağların hem tanımlanmasını hem de göreceli nicel analizini mümkün kılan karakteristik soğurma bantlarını oluşturmaktadır (Dyamenahalli ve ark., 2015). Tek bir kimyasal yapı hiçbir zaman diğerinin aynısı bir IR spektrumu üretmez; bu nedenle IR spektrumu parmak izi gibi benzersizdir. Bu özellik, belirli analitik amaçlar için IR spektroskopisini oldukça değerli kılmaktadır. Ayrıca, bilinmeyen malzemelerin tanımlanması, bir örneğin kalite veya tutarlılığının belirlenmesi ve bir karışımdaki bileşenlerin sayısının tespit edilmesi de mümkündür.

Kompozit yapının içerisindeki fonksiyonel grupları belirlemek amacıyla FT-IR spektroskopisi analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analiz, Bruker Vertex 70 cihazı kullanılarak $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$ dalga boyu aralığında ve 2 cm^{-1} aralıkla yapılmıştır.

4.4.2 SEM ve EDX analizleri

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), polimerlerin yüzey morfolojisini incelemede yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. SEM'in görüntü çözünürlüğü genellikle geçirimli elektron mikroskobu (TEM)'den birkaç kat daha düşüktür, ancak mükemmel alan derinliğine sahiptir ve bu da bir polimerin üç boyutlu yapılarının doğru şekilde görüntülenmesini temsil edilebilmektedir. Ayrıca elektron geçirgenliğine ihtiyaç duymadığı için birkaç santimetre boyutundaki örnekler de incelenebilir ve numune hazırlığı oldukça basittir. Ancak polimerler gibi yalıtkan malzemelerde yüzey yüklenmesini önlemek için genellikle altın, platin veya paladyum alaşımlarıyla ince kaplama yapılması ya da düşük hızlandırıcı voltaj kullanılması gerekmektedir (Dyamenahalli ve ark., 2015). Ayrıca, kompozitlerin elementel bileşiminin belirlenmesi, enerji dağılımlı X-ışını (EDX) analizi ile gerçekleştirilmiştir.

4.4.3 Korozyon direnci testi

Kompozit malzemelerin korozyon dayanımlarını belirlemek için %3 NaCl, %10 HCl, %10 NaOH çözeltileri ve su kullanılmıştır (Kaya ve Deveci, 2020b). Küçük numuneler iki hafta boyunca bu ortamlarda tutulmuş, bu süreçte çözeltilerin renkleri ve malzemelerin dış görünüşleri her gün kontrol edilmiştir.

4.4.4 Su sorpsiyon testi

Su sorpsiyon davranışlarını incelemek için kompozit numunelerden kesilen küçük parçalar saf suya daldırılarak iki hafta süreyle bekletilmiştir. Belirli zaman aralıklarında sudan çıkarılan örnekler, yüzeylerindeki serbest suyun filtre kâğıdı ile kurutulmasının ardından analitik terazide tartılmıştır. Kompozitlerin % su sorpsiyon oranları, Denklem 1'den yararlanılarak hesaplanmıştır. Difüzyon katsayısı ise Denklem 2 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\% Su\ sorpsiyonu = \frac{(m_t - m_o)}{m_o} * 100$$

Denklem 1

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 4 \left(\frac{Dt}{\pi h^2} \right)^{1/2}$$

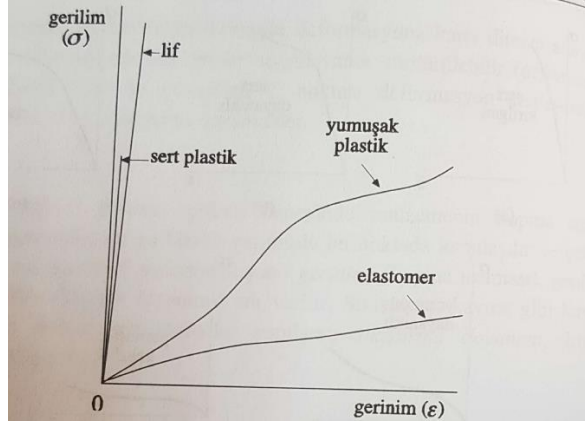
Denklem 2

m_o (g):	malzemenin başlangıç kütlesi
m_t (g):	malzemenin t zamanında kütlesi
M_t (%):	malzemenin t zamanında su sorpsiyonu
M_∞ (%):	malzemenin denge durumunda su sorpsiyonu
h (mm):	malzemenin kalınlığını
D (mm ² /s):	difüzyon katsayısı
t (s):	zaman

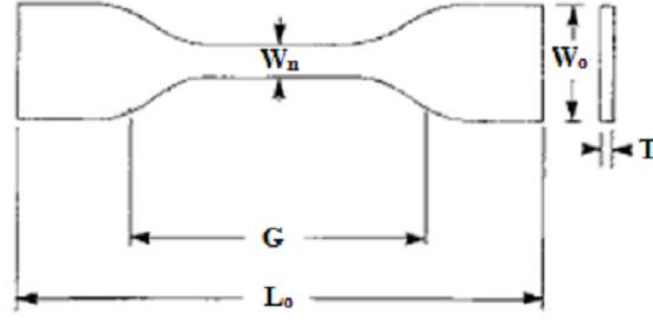
4.4.5 Çekme testi

Çekme ve basma testleri, polimerlerin mekanik özelliklerini belirlemede temel yöntemlerdir. En basit yöntem olan tek eksenli çekme testinde, numune sabit gerinim hızında zorlanarak kırılana kadar gerilir ve sonuçlar gerilme-gerinim eğrisi ile ifade edilir. Bu eğriden çekme dayanımı, Young modülü, Poisson oranı, akma ve kırılma uzaması gibi parametreler hesaplanmaktadır. Çekme test cihazları genellikle tüm test süresince sabit sıcaklıkta çalışmaktadır. Şekil 4.15'te lif, kauçuk, sert ve yumuşak polimerlerde tipik gerinim-gerilim ilişkileri gösterilmiştir (Saçak, 2017).

Çekme testleri, ASTM D638 standardına uygun olarak, TST-Mares/TS-mxe model çekme-kopma cihazında, oda sıcaklığında ve 5 mm/dk hızla uygulanmıştır. Testler, tek kantilever modunda yapılmış olup, numunelerin nominal boyutları 140×20×5 mm olarak ayarlanmıştır. Testler sonucunda; Young modülü, çekme dayanımı ve kopma uzaması gibi mekanik parametreler kaydedilmiştir. Şekil 4.16'da sunulan numunelere ait boyutlar Çizelge 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.15. Lif, kauçuk, sert ve yumuşak polimerlerde tipik gerinim-gerilim ilişkileri (Saçak, 2017)



Şekil 4.16. Çekme testi numunesi

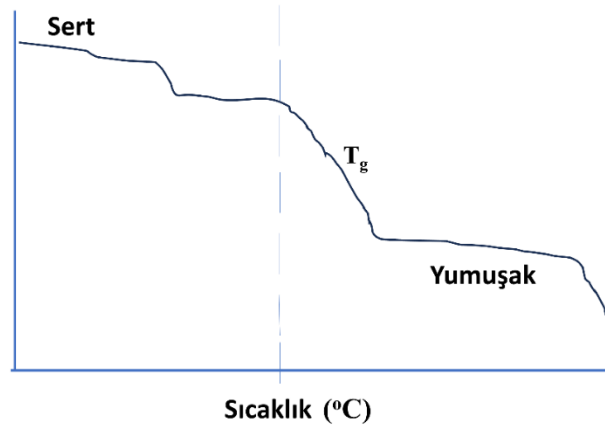
Çizelge 4.7. Numunenin ebadı

Özellik	Değeri	Birim
Kalınlık (T)	5 ± 0.2	mm
Toplam uzunluk (L_o)	140	mm
Geniş kesit genişliği (W_o)	20 ± 0.2	mm
Dar kesit genişliği (W_n)	10 ± 0.2	mm
Dar kesit uzunluğu (G)	80 ± 2.0	mm

4.4.6 DSC analizi

Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC), en yaygın kullanılan termal karakterizasyon yöntemlerinden biridir ve malzemelerin nihai kullanım amacından bağımsız olarak, özelliklerine ilişkin ayrıntılı bilgilerin hızlı ve güvenilir bir şekilde elde edilmesini sağlamaktadır. Bu teknik, bir numunenin ısıtılması, soğutulması veya izotermal koşullarda tutulması sırasında meydana gelen enerji değişimlerini ve bunlara karşılık gelen geçiş sıcaklıklarını ölçer (Dev ve ark., 2023). DSC'nin önemli bir avantajı, numunelerin çok az hazırlık gerektirmesi ve kolayca kapsüllenerek doğrudan cihaza yerleştirilip analiz edilebilmesidir (Gabbott, 2008). Bu yöntem aracılığıyla T_g , T_m ve kaynama noktaları, kristalleşme davranışı, kristallik derecesi, füzyon entalpisi, reaksiyon kinetiği ve diğer ısıl olarak indüklenen süreçler gibi kritik termal parametreler doğru bir şekilde belirlenebilmektedir. Şekil 4.17'de sıcaklığa bağlı olarak elde edilen bir DSC eğrisi sunulmaktadır.

DSC analizleri METTLER TOLEDO cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, azot (N_2) atmosferinde, $10\text{ }^{\circ}\text{C/dk}$ ısıtma hızıyla yapılmış ve sıcaklık 25°C 'den 250°C 'ye kadar artırılarak T_g belirlenmiştir.



Şekil 4.17. Sıcaklığa bağlı olarak elde edilen DSC eğrisi.

4.4.7 Yanma testi

Yatay ve dikey yanma ölçümleri, epoksi reçinelerin alev geciktirici özelliklerini belirlemede yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir. Bu yöntemde numunenin bir ucu yatay ya da dikey olarak sabitlenir, serbest ucu belirli bir gaz alevine maruz bırakılır ve ilgili parametrelerin ölçülmesiyle yanma performansı değerlendirilir. Yatay yanma davranışı doğrusal yanma hızı üzerinden belirlenirken, dikey yanma davranışı ise kalıcı alev ve kor süresi, yanma bölgesi ve eriyik damlacıkların varlığı gibi parametrelerle değerlendirilmektedir. Polimerlerin yanıcılığını belirlemede en yaygın kullanılan yöntemlerden biri UL-94 dikey yanma testi olup, aynı zamanda yanma sürecindeki eriyik damlacık davranışını da ortaya koymaktadır (Zhi ve ark., 2022). Bu testte polimerler beş farklı sınıfta değerlendirilir: V-0, V-1, V-2, V-5 ve sınıflandırma dışı (NR); bunlar arasında V-0 en iyi alev geciktirici performansı temsil etmektedir.

Kompozitlerin alev geciktirici özelliklerini değerlendirmek amacıyla, ASTM D3801-10 standardına uygun olarak dikey yanma (UL 94) testi uygulanmıştır. Test numunelerinin boyutları $140 \times 20 \times 5$ mm olarak ayarlanmıştır.

4.4.8 Şekil hafıza testi

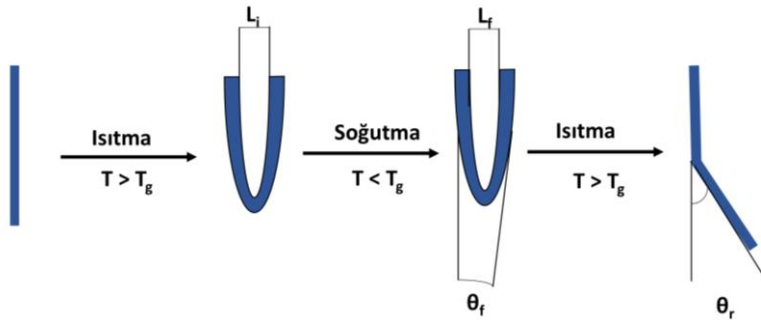
Kompozitlerin şekil hafızası davranışını incelemek amacıyla bükme testi uygulanmaktadır. Bükme testi, Şekil 4.18'da gösterildiği gibi üç adımdan oluşmaktadır. İlk aşamada numune etüve yerleştirilmiş ve homojen ısınma sağlamak amacıyla 5 dakika tutulmuştur. Daha sonra, sabit gerinimin korunabilmesi için numune sabit çaplı (6 cm) bir beher içinde bükülmüş ve uçlar arasındaki mesafe L_i olarak ölçülmüştür (Şekil 4.19). Numune oda sıcaklığına ulaştığında beherden çıkarılmış ve uçlar arasındaki mesafe bu kez L_f olarak kaydedilmiştir. Ardından, şekil sabitleme oranı (R_f) Denklem (3) kullanılarak hesaplanmış, ayrıca beherden çıkarıldıktan sonra açısı ölçülmüştür (Θ_f). Daha sonra numune tekrar etüve yerleştirilmiş ve tam şekil geri kazanımı tamamlanıncaya kadar bekletilmiştir. Etüvden çıkarıldıktan sonra geri kazanım açısı (Θ_r) ölçülmüş ve şekil geri kazanım oranı Denklem (4) ile hesaplanmıştır (Wagermaier ve ark., 2010). Son olarak, üçüncü şekil hafıza özelliği olan şekil geri kazanım süresi (t_r)

belirlenmiştir. Bu parametre, sabitlenmiş numunenin etüve yerleştirilmesinden şekil geri kazanımının tamamlandığı ana kadar geçen toplam süreyi ifade etmektedir.

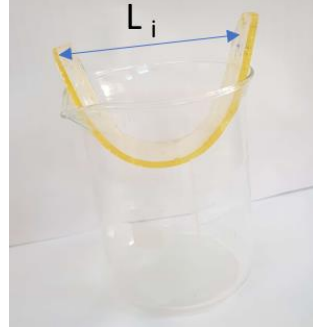
Termal olarak aktive edilen şekil hafıza testleri, bükme yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. MNA ve sikloalifatik poliamin ile sertleştirilmiş epoksi için bükme testleri 90, 100, 110 ve 120 °C’de; sitrik asit ile sertleştirilmiş epoksi için ise 80, 90, 100 ve 110 °C’de uygulanmıştır. Bu testlerin amacı optimum aktivasyon sıcaklığının belirlenmesidir. Optimum sıcaklık, ilk epoksi sistemi için 110 °C, ikinci sistem için ise 100 °C olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlara dayanarak kompozit numunelere döngü bükme testleri belirlenen optimum sıcaklıklarda uygulanmıştır. Üretilen şekil hafızalı numuneler 140 × 28 × 2,8 mm boyutlarındadır. Deneysel prosedür dört aşamadan oluşmaktadır.

$$R_f = \frac{L_i}{L_f} \times 100\% \quad (\text{Denklem 3})$$

$$R_r = \frac{\theta_f - \theta_r}{\theta_f} \times 100 \% \quad (\text{Denklem 4})$$



Şekil 4.18. Bükme testinin şematik gösterimi



Şekil 4.19. L_i 'nin şematik gösterimi

4.4.9 Şekil hafıza döngüsü

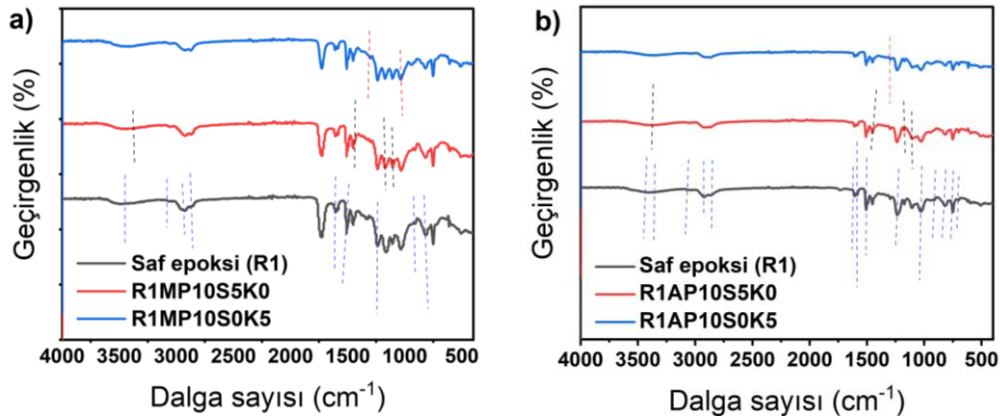
Numunelere, geri kazanım oranı, şekil sabitleme oranı ve geri kazanım süresi gibi özelliklerin dayanıklılığını değerlendirmek üzere 10 defa şekil hafızası testi uygulanmıştır. Her biri arasında 30 dakikalık bekleme süresi bırakılmıştır.

Yukarıda açıklanan tüm karakterizasyon testleri, her bir numune için üç kez tekrarlanmış ve sonuçların aritmetik ortalamaları hesaplanarak raporlanmıştır.

5 ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

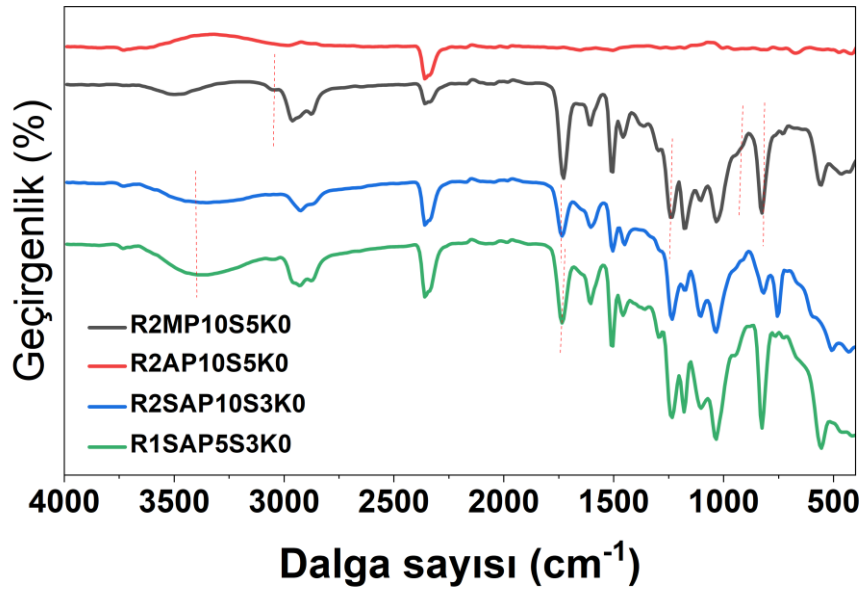
5.1 FT-IR Analizi

Numunelerin kimyasal bağlanması FT-IR spektrumu ile Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Saf epoksiye (R1) ait karakteristik bant (O–H gerilme titreşimleri) 3450 cm^{-1} de tespit edilmiştir. 2930 ve 2860 cm^{-1} deki pikler sırasıyla alifatik C–H asimetric ve simetric gerilme titreşimlerine karşılık gelmektedir. Aromatik -C=C- gerilme titreşimlerine ait pikler 1610 ve 1510 cm^{-1} de gözlemlenmiştir (Hamciuc ve ark., 2022). Ayrıca, 1240 , 918 ve 830 cm^{-1} 'de görülen pikler sırasıyla C–O–C eter gerilmesi, C–O oksiran grubunun gerilmesi ve oksiran grubunun C–O–C gerilmesine karşılık gelen pikler, epoksi gruplarının varlığını ortaya koymuştur (Kocaman ve Ahmetli, 2016). Ayrıca, sikloalifatik poliamin ile sertleştirilen R1 kompoziti için 3344 cm^{-1} deki bant, 1583 , 1031 ve $750\text{--}711\text{ cm}^{-1}$ deki pikler sırasıyla NH_2 gerilme titreşimlerine, NH_2 bükülme titreşimine, C–N gerilme titreşimlerine ve NH_2 bükülme titreşimlerine karşılık gelmektedir. Genel olarak dolgu maddesi ilavesiyle birlikte piklerin şiddeti azalmış ve hafifçe sola kaymıştır. Sepiyolit ilavesi durumunda, bant/pikler sırasıyla 3380 , 1452 , 1178 ve 1108 cm^{-1} de gözlemlenmiş olup, bunlar sırasıyla O–H gerilme titreşimlerine, Si–OH gerilme titreşimlerine ve tetrahedral tabakadaki Si–O gruplarına karşılık gelmektedir (Dutta ve Devi, 2021). Ayrıca yaklaşık 1290 ve 1039 cm^{-1} civarında gözlemlenen küçük piklerin kolemanit ilavesiyle ilişkili olarak B–O asimetric ve simetric gerilme titreşimlerine ait olduğu belirlenmiştir (Erdem ve Doğan, 2023).



Şekil 5.1. a) MNA ve b) sikloalifatik poliamin ile sertleştirilen R1 kompozitlerin FT-IR spektrumları

Farklı sertleştiriciler ile kürlenen R2 reçinesine ait FT-IR spektrumları Şekil 5.2'de gösterilmiştir. R2 reçinesi için, C–O–C eter gerilmesi, oksiran grubunun C–O gerilmesi ve oksiran halkasının C–O–C titreşimlerinin şiddetleri artmış ve bu piklerin konumları sırasıyla 825, 925 ve 1242 cm^{-1} e kaymıştır. Ayrıca, 3052 cm^{-1} de metilen ($-\text{CH}_2-$) grubunun titreşimine karşılık gelen bir pik gözlenmiştir. SA ile kürlenen R2 ve R1 epoksi reçineler için 3411 cm^{-1} de yer alan absorpsiyon bandının genişlemesi, hidroksil ($-\text{OH}$) gruplarının karşılama göstermektedir. Ayrıca, 1741 cm^{-1} de ortaya çıkan bir pik, ester gruplarına ait karakteristik C=O gerilme titreşimini göstermektedir (Tudorachi ve Mustata, 2020).

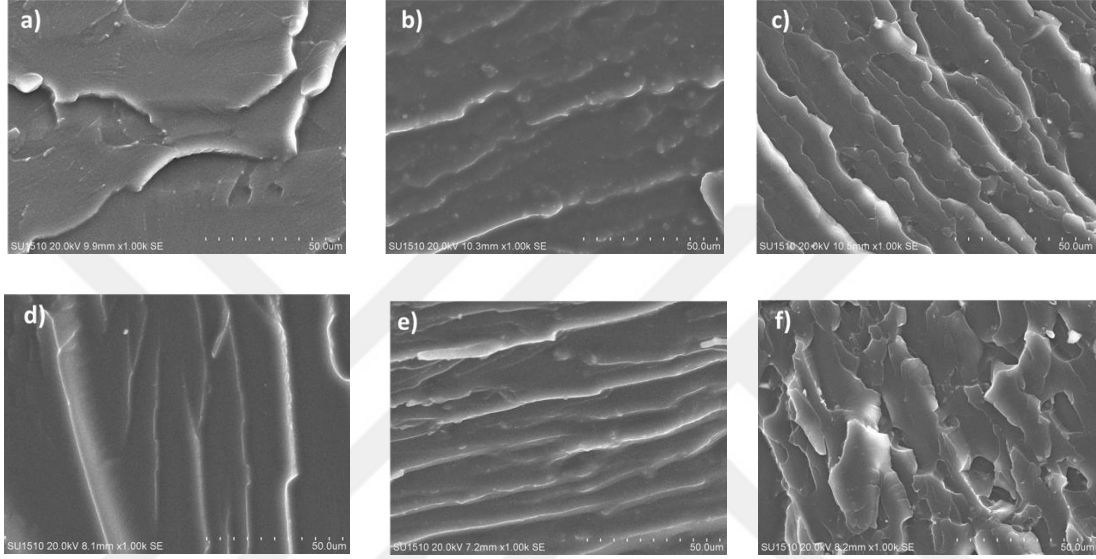


Şekil 5.2. Farklı sertleştiriciler ile kürlenen R2 reçinesine ve SA ile kürlenen R1 reçinesine ait FT-IR spektrumları

5.2 SEM/EDX Analizi

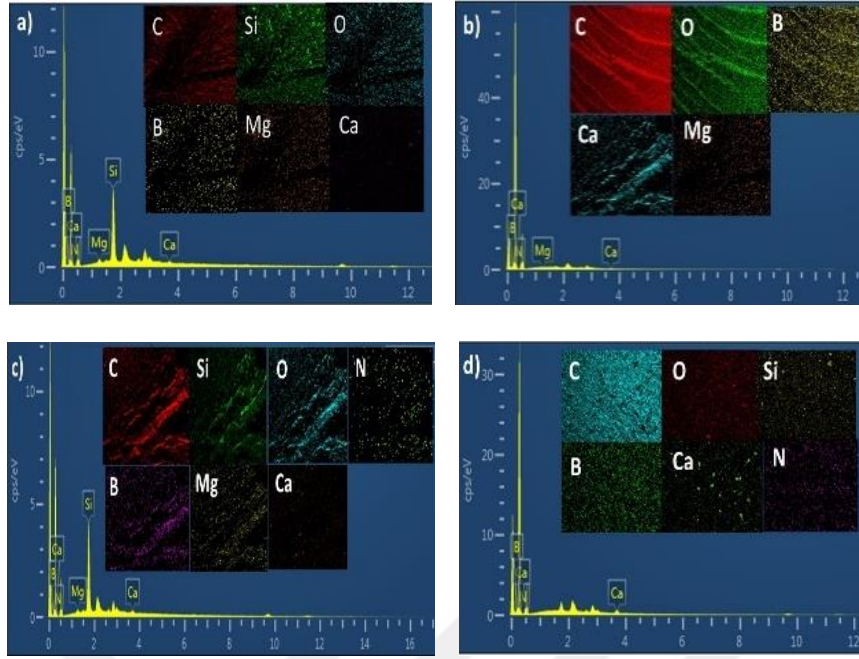
Şekil 5.3'te numunelerin kesitine ait SEM görüntülerini göstermektedir. Şekil 5.3.a ve Şekil 5.3.d 'de gösterildiği gibi sırasıyla MNA ve sikloalifatik poliamin farklı sertleştiricilerle kürlenen saf epoksi R1 düzgün bir yüzeye sahiptir. Dolgu maddesi ilavesiyle yüzey pürüzlülüğü artmıştır; bu durum, dolgu maddesinin epoksi reçinesinin tokluğunu önemli ölçüde artırdığını doğrulamaktadır. Dolgu parçacıklarının polimer matrisindeki dağılımı, dolgu malzemelerinin özellikleriyle ilişkilendirilmektedir

(Fernandes ve ark., 2018). Bu çalışmada elde edilen SEM görüntüleri ile epoksi polimer kompozitlerde dolgu maddesinin düzgün ve homojen şekilde dağıldığını göstermiştir. Kolemanit içeren kompozitler farklılık göstermiştir; parçacıkların bir araya toplanma eğilimi, dolgu maddesi ile kompozit malzeme arasında bir miktar uyumsuzluk olduğuna işaret etmektedir.



Şekil 5.3. SEM görüntüleri: MNA ile sertleştirilen R1 kompozitler (a) saf epoksi (R1), (b) R1MP10S5K0, (c) R1MP10S0K5 ve sikloalifatik poliamin ile sertleştirilen R1 kompozit (d) saf epoksi (R1), (e) R1AP10S5K0 ve (f) R1AP10S0K5.

MNA ve sikloalifatik poliamin ile sertleşen R1 Kompozitlerin EDX spektrumu Şekil 5.4'te gösterilmiştir. Sikloalifatik poliamin ile sertleştirilen kompozitlerde (Şekil 5.4.c ve d) N elementine ait bir pik gözlemlenmiştir. Sepiyolit içeren epoksi kompozitte (Şekil 5.4.a ve c) Si elementine ait bir pik ortaya çıkmıştır. Kolemanit içeren epoksi kompozitte (Şekil 5.4.b ve d) ise B elementine ait pik şiddeti artmıştır. Ayrıca, magnezyum (Mg) ve kalsiyum (Ca) gibi ikincil bileşenlerin pik şiddetlerinde de değişiklikler gözlenmiştir.



Şekil 5.4. EDX görüntüleri: MNA ile sertleştirilen R1 kompozit (a) R1MP10S5K0, (b) R1MP10S0K5 ve sikloalifatik poliamin ile sertleştirilen R1 kompozit (c) R1AP10S5K0 ve (d) R1AP10S0K5, (Küçük kutucuklarda farklı elementler için yapılan elementel haritalama gösterilmektedir).

5.3 Korozyon Direnci Testi

Korozyon davranışlarını ve kütle kayıplarını incelemek amacıyla, kompozit numuneler farklı kimyasal ortamlara (asit, baz ve tuz çözeltileri) maruz bırakılmıştır. Bu testlerden elde edilen sonuçlar Çizelge 5.1- Çizelge 5.3'te özetlenmiştir. Numunelerin korozyon dayanımları dayanıklı, orta dayanıklı ve dayanıksız sırasıyla ++, +- ve -- şeklinde gösterilmiştir.

Çizelge 5.1'den görüldüğü gibi %10 HCl içeren korozyon testlerinde, R1 ve R2 saf epoksi formülasyonlarının yüksek kimyasal dayanım gösterdiği, buna karşın PEG ve inorganik dolgu maddesi ilavesinin bu direnci genellikle orta düzeye düşürdüğü veya tamamen dayanıksız hale getirdiği gözlenmiştir. Modifiye edilmemiş epoksilerin üstün asit dayanımı, iyonik difüzyonu (özellikle H^+ ve Cl^- iyonlarının geçişini) büyük ölçüde sınırlayan, yüksek oranda çapraz bağlı ve yoğun bir ağ yapısından kaynaklanabilir. Buna karşılık, PEG ilavesi epoksi matriste hidrofilik segmentler oluşturur ve serbest hacmi artırır; bu da asidik ortamın daha kolay malzeme içine nüfuz etmesine yol açar. Benzer şekilde, dolgu maddeleri özellikle homojen olmayan veya matrise zayıf şekilde

bağlanmış olanlar ise mikrogözenek, ara yüzey ayrılmaları veya mikro çatlaklar gibi kusurlar oluşturabilir. Bu kusurlar, bariyer bütünlüğünü zayıflatır ve korozyonun ilerlemesini hızlandırır. Malzemelerde bir şişme ve çatlama gözlenmemiştir. Ancak, MNA ve SA ile sertleşen iki farklı epoksi, saf epoksi R1 ve R2 hariç; kompozitlerinin çözeltilerin ve malzemelerin renginde değişiklikler görülmüştür. Bu gözlemler literatürde desteklenmektedir. Örneğin, epoksi reçinelerin farklı sertleştiricilerle yapılan korozyon davranışı çalışmasında, asidik ortamın epoksi kompozitlerde kimyasal bozulmaya yol açabileceği ve çözeltilerin renginin değiştiği belirtilmiştir (Sembokuya ve ark., 2003).

Çizelge 5.1. Kompozit malzemelerin (%10 HCl) korozyon testi sonuçları

Epoksi reçine	Sertleştirici	Numune	m ₁ (g)	m _s (g)	%	Korozyon dayanımı
R1	MNA %30	Saf epoksi (R1)	0,707	0,710	0,495	++
		R1MP10S0K0	0,874	0,894	2,288	+-
		R1MP10S0K5	0,761	0,837	10,026	--
		R1MP10S5K0	0,651	0,686	5,267	--
	Sikloalifatik poliamin %25	Saf epoksi (R1)	0,464	0,467	0,797	++
		R1AP10S0K0	0,505	0,526	4,179	+-
		R1AP10S0K5	0,533	0,559	5,088	--
		R1AP10S5K0	0,774	0,829	7,119	--
	SA %25	Saf epoksi (R1)	1,063	1,069	0,630	++
		R1SAP10S0K0	1,015	1,029	1,447	+-
		R1SAP10S0K5	0,817	0,844	3,317	+-
		R1SAP10S5K0	0,635	0,761	19,861	--
R2	MNA %30	Saf epoksi (R2)	0,802	0,811	1,122	+-
		R2MP10S0K0	0,601	0,606	0,865	++
		R2MP10S0K5	0,646	0,648	0,480	++
		R2MP10S5K0	0,640	0,677	5,858	--
	Sikloalifatik poliamin %25	Saf epoksi (R2)	0,750	0,754	0,533	++
		R2AP10S0K0	0,299	0,308	3,449	+-
		R2AP10S0K5	0,589	0,610	3,601	+-
		R2AP10S5K0	0,566	0,593	4,627	+-
	SA %25	Saf epoksi (R2)	1,085	1,094	0,866	++
		R2SAP10S0K0	1,025	1,098	7,144	--
		R2SAP10S0K5	0,848	0,923	8,881	--
		R2SAP10S5K0	0,574	0,586	2,161	+-
++ dayanıklı		+- orta dayanıklı		-- dayanıksız		

Bazik ortam (%10 NaOH) korozyon testlerinde, incelenen kompozitlerin neredeyse tamamı orta düzeyde kimyasal dayanım sergilemiş ancak bazı sistemlerde belirgin bozulmalar gözlenmiştir (Çizelge 5.2). Özellikle R1MP10S5K0 ve R2AP10S0K5 düşük alkali dayanımı göstermiştir. Bu davranış, epoksi ağ yapısının alkali iyonlarına karşı sınırlı kimyasal kararlılığıyla ilişkilidir. Bazik ortamda bulunan OH⁻ iyonları, epoksi-eter bağlarını ve ester bağlantılarını kolaylıkla hidrolize edebilir; bu durum, ağ yapısında zincir kopmalarına, kütle kaybına ve yüzey bozulmasına yol açar. Özellikle dolgu maddesi-matris ara yüzeylerinde zayıf bağlar veya gözenekli bölgeler varsa, NaOH çözeltisi bu bölgelere hızla nüfuz edebilir. SA ile sertleşen iki epoksi reçineleri olumsuz bir şekilde etkilenmiş ve parçalar çözeltide yumuşayarak koyu jel kıvamına gelmişlerdir.

Çizelge 5.2. Kompozit malzemelerin (%10 NaOH) korozyon testi sonuçları

Epoksi reçine	Sertleştirici	Numune	m _i (g)	m _s (g)	%	Korozyon dayanımı	
R1	MNA %30	Saf epoksi (R1)	0,779	0,784	0,693	++	
		R1MP10S0K0	0,705	0,718	2,029	+-	
		R1MP10S0K5	0,531	0,542	2,109	+-	
		R1MP10S5K0	0,519	0,604	16,221	--	
	Sikloalifatik poliamin %25	Saf epoksi (R1)	0,347	0,352	1,585	+-	
		R1AP10S0K0	0,364	0,371	1,758	+-	
		R1AP10S0K5	0,465	0,468	0,839	++	
		R1AP10S5K0	0,636	0,649	2,122	+-	
	R2	MNA %30	Saf epoksi (R2)	0,482	0,493	2,112	+-
			R2MP10S0K0	0,458	0,467	2,008	+-
R2MP10S0K5			0,603	0,609	1,044	+-	
R2MP10S5K0			0,501	0,521	4,089	+-	
Sikloalifatik poliamin %25		Saf epoksi (R2)	0,538	0,547	1,711	+-	
		R2AP10S0K0	0,448	0,454	1,337	+-	
		R2AP10S0K5	0,421	0,457	8,771	--	
		R2AP10S5K0	0,477	0,489	2,515	+-	
++ dayanıklı		+- orta dayanıklı		-- dayanıksız			

Tuz ortamında yapılan korozyon test sonuçları Çizelge 5.3 'te gösterilmiştir. %3 NaCl ortamında, MNA ve sikloalifatik poliamin sertleştiriciler ile kürlenmiş epoksi sistemleri, yüksek korozyon direnci göstererek yapısal bütünlüklerini korumuş ve sınırlı düzeyde bozulma sergilemiştir. Bu dayanım, söz konusu sertleştiricilerle oluşturulan epoksi ağlarının yüksek çapraz bağ yoğunluğu ve hidrofobik karakteriyle ilişkilidir. Bu yapılar, iyonik difüzyonu ve su alımını etkili biçimde engeller. Özellikle MNA ile kürlenmiş sistemlerin yoğun ve rijit ağ yapısı serbest hacmi minimize ederken,

sikloalifatik poliamin ile kürlenene sistemlerdeki stabil zincirler arası bağlar tuz çözeltilerine karşı bariyer özelliklerini güçlendirir.

Buna karşılık, SA ile sertleşen epoksi reçine kompozitler, NaCl ortamında daha düşük direnç göstermiştir. Bunun temel nedeni, SA'nın yapısında bulunan ek hidroksil (–OH) gruplarının polimer matrisin hidrofilikliğini artırmasıdır. Bu durum, suyun ve klorür iyonlarının hidrojen bağları yoluyla polimer içine daha kolay difüze olmasına olanak tanır. Böylece iyonik iletkenlik artar ve polimer ve çözelti ara yüzeyinde bölgesel bozulmalar meydana gelir. İlginç bir şekilde, SA bazlı sistemler tuzlu ortamda düşük direnç gösterirken asitli ortamlarda daha kararlı davranmaktadır. Bu fark, asit–baz nötrleşme etkileşimleriyle açıklanabilir. Malzemelerin ve çözeltilerin renginde bir değişiklik olmamıştır. Ayrıca, malzemelerde çatlama, şişme ve parçalanma da gözlenmemiştir.

Çizelge 5.3. Kompozit malzemelerin (%3 NaCl) korozyon testi sonuçları

Epoksi reçine	Sertleştirici	Numune	m ₁ (g)	m _s (g)	%	Korozyon dayanımı
R1	MNA %30	Saf epoksi (R1)	0,588	0,592	0,646	++
		R1MP10S0K0	0,724	0,734	1,339	+-
		R1MP10S0K5	0,353	0,358	1,215	+-
		R1MP10S5K0	0,558	0,568	1,773	+-
	Sikloalifatik poliamin %25	Saf epoksi (R1)	0,287	0,289	0,836	++
		R1AP10S0K0	0,362	0,371	2,429	+-
		R1AP10S0K5	0,399	0,406	1,603	+-
		R1AP10S5K0	0,597	0,612	2,325	+-
	SA %25	Saf epoksi (R1)	1,091	1,106	1,356	+-
		R1SAP10S0K0	1,019	1,041	2,139	+-
		R1SAP10S0K5	0,892	0,919	2,957	+-
		R1SAP10S5K0	0,635	0,659	3,823	+-
R2	MNA %30	Saf epoksi (R2)	0,422	0,425	0,758	++
		R2MP10S0K0	0,302	0,306	1,658	+-
		R2MP10S0K5	0,572	0,578	0,925	++
		R2MP10S5K0	0,393	0,399	1,549	+-
	Sikloalifatik poliamin %25	Saf epoksi (R2)	0,554	0,558	0,722	++
		R2AP10S0K0	0,333	0,341	2,282	+-
		R2AP10S0K5	0,401	0,407	1,597	+-
		R2AP10S5K0	0,471	0,481	2,036	+-
	SA %25	Saf epoksi (R2)	0,788	0,802	1,764	+-
		R2SAP10S0K0	0,687	0,707	2,910	+-
		R2SAP10S0K5	0,723	0,748	3,329	+-
		R2SAP10S5K0	0,509	0,523	2,710	+-
++ dayanıklı		+- orta dayanıklı		-- dayanıksız		

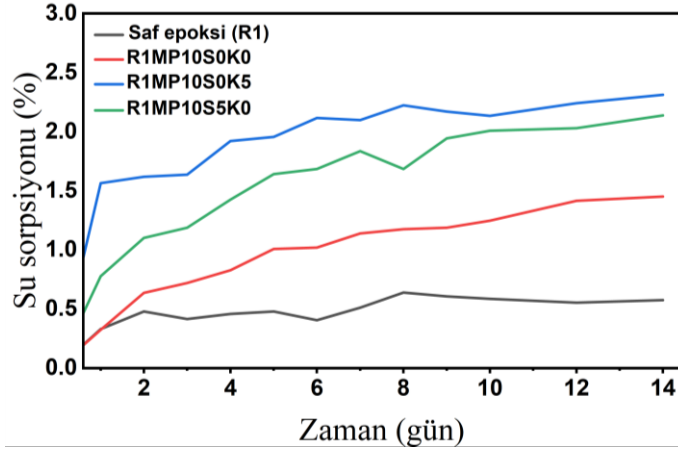
5.4 Su Sorpsiyon Testi

MNA ile sertleşen iki farklı epoksi reçine (R1 ve R2) kompozit malzemelerin % su sorpsiyon test sonuçları Çizelge 5.4' te verilmiştir. Bu sonuçlar kuru tartım ile başlayıp günlük olarak ve onuncu günden sonra iki gün arayla kütle ölçümleri alınmıştır. R1 ve R2 için elde edilen verilerin % su sorpsiyon grafikleri sırasıyla Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da gösterilmiştir.

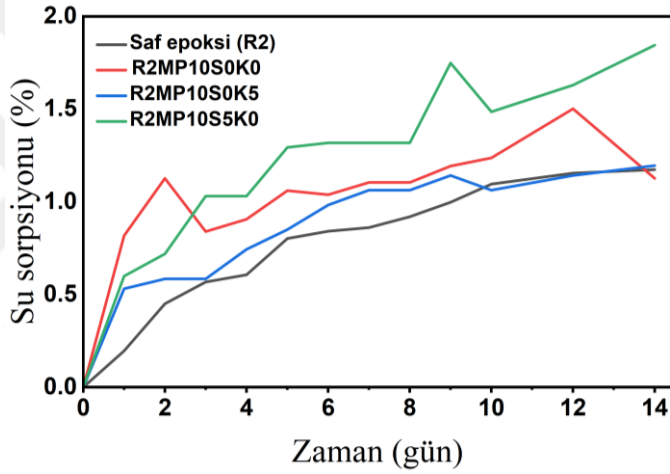
Kompozit malzemelerin su sorpsiyon değerleri zamana bağlı olarak bir artış göstermiştir. Saf epoksi PEG'li ve dolgu madde içeren kompozitlere göre daha az % su sorpsiyonu göstermiştir. PEG moleküllerinin yapısındaki hidroksil grupları, su molekülleriyle etkileşime girerek hidrojen bağları oluşturmuş ve bu durum malzemelerin yüksek miktarda su absorbe etmesine sebep olmuştur. Kompozit tabakaları arasına nüfuz eden su molekülleri sonucunda, R1MP10S0K5 ve R1MP10S5K0 kompozit malzemeleri için iki haftadan sonra su sorpsiyon değerleri sırasıyla %2,31 ve %2,14 olarak belirlenmiştir. R2MP10S0K5 ve R2MP10S5K0 kompozit malzemeleri için ise sırasıyla %1,19 ve %1,84 olarak bulunmuştur.

Çizelge 5.4. MNA ile kürlenene epoksi reçinelerin kompozit malzemelerin % su sorpsiyon test sonuçları (g)

Kompozit	1. gün	2. gün	3. gün	4. gün	5. gün	6. gün	7. gün	8. gün	9. gün	10. gün	12. gün	14. gün	D (mm ² /s)
Saf epoksi (R1)	0,3299	0,4789	0,4151	0,4576	0,4789	0,4044	0,5109	0,6386	0,6066	0,5854	0,5534	0,5747	1.19x10 ⁻⁵
R1MP10S0K0	0,3238	0,6356	0,7195	0,8274	1,0073	1,0193	1,1392	1,1752	1,1871	1,2472	1,4150	1,4510	1.23 x10 ⁻⁵
R1MP10S0K5	1,5647	1,6181	1,6358	1,9203	1,9559	2,1159	2,0982	2,2226	2,1692	2,1337	2,2404	2,3115	1.21 x10 ⁻⁵
R1MP10S5K0	0,7772	1,1010	1,1874	1,4249	1,6408	1,6839	1,8351	1,6839	1,9430	2,0078	2,0294	2,1373	1.16 x10 ⁻⁵
Saf epoksi (R2)	0,1956	0,4498	0,5671	0,6063	0,8019	0,8409	0,8606	0,9192	0,9975	1,0952	1,1539	1,1735	1.25 x10 ⁻⁵
R2MP10S0K0	0,8169	1,1261	0,8390	0,9053	1,0598	1,0378	1,1039	1,1039	1,1923	1,2365	1,5014	1,1261	2.29 x10 ⁻⁵
R2MP10S0K5	0,5311	0,5842	0,5841	0,7435	0,8497	0,9825	1,0621	1,0621	1,1418	1,0621	1,1418	1,1949	1.18 x10 ⁻⁵
R2MP10S5K0	0,5988	0,7186	1,0299	1,0299	1,2934	1,3174	1,3174	1,3174	1,7485	1,4850	1,6287	1,8443	1.00 x10 ⁻⁵



Şekil 5.5. MNA ile sertleştirilen R1 epoksi reçine kompozit malzemelerin % su sorpsiyon test grafiği



Şekil 5.6. MNA ile sertleştirilen R2 epoksi reçine kompozit malzemelerin % su sorpsiyon test grafiği

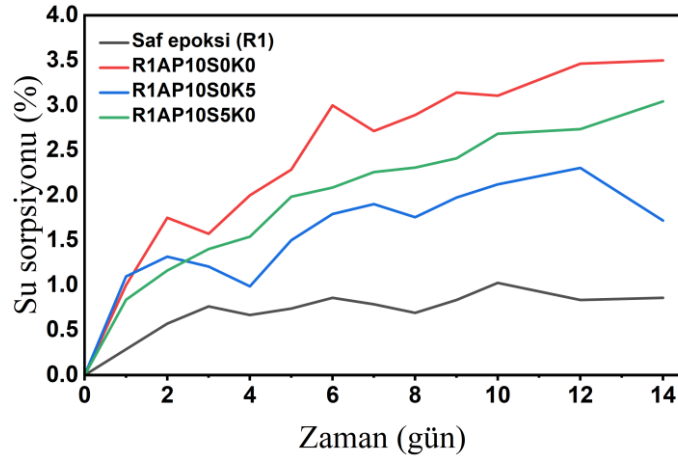
Sikloalifatik poliamin ile sertleşen iki farklı epoksi reçine (R1 ve R2) kompozit malzemelerin % su sorpsiyon test sonuçları Çizelge 5.5'te verilmiştir. Bu sonuçlar kuru tartım ile başlayıp günlük olarak ve onuncu günden sonra iki gün arayla kütle ölçümleri alınmıştır. R1 ve R2 için edilen verilerin % su sorpsiyon grafikleri sırasıyla Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de gösterilmiştir.

Kompozit malzemelerin su sorpsiyon değerleri zamana bağlı olarak bir artış göstermiştir. Saf epoksi PEG'li ve dolgu madde içeren kompozitlere göre daha az % su sorpsiyonu göstermiştir. PEG moleküllerinin yapısındaki hidroksil grupları, su molekülleriyle etkileşime girerek hidrojen bağları oluşturmuş ve bu durum malzemelerin

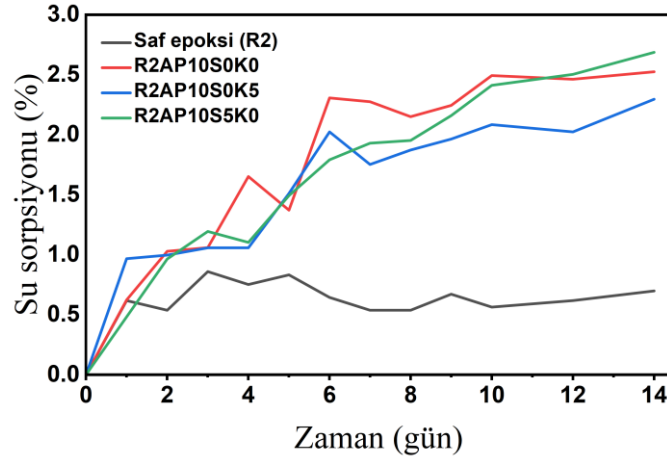
yüksek miktarda su absorbe etmesine sebep olmuştur. Kompozit malzemelerin % su sorpsiyonu, R1AP10S0K5 ve R1AP10S5K0 kompozit malzemeleri için iki haftadan sonra su sorpsiyon değerleri sırasıyla %1,72 ve %3,04 olarak belirlenmiştir. R2AP10S0K5 ve R2AP10S5K0 kompozit malzemeleri için ise sırasıyla %2,30 ve %2,69 olarak bulunmuştur.

Çizelge 5.5. Sikloalifatik poliamin ile kürlenen epoksi reçinelerin kompozit malzemelerin % su sorpsiyon test sonuçları (g)

Kompozit	1. gün	2. gün	3. gün	4. gün	5. gün	6. gün	7. gün	8. gün	9. gün	10. gün	12. gün	14. gün	D (mm ² /s)
Saf epoksi (R1)	0,2861	0,5722	0,7630	0,6676	0,7391	0,8584	0,7868	0,6915	0,8345	1,0252	0,8345	0,8584	1.212 x10 ⁻⁵
R1AP10S0K0	0,9993	1,7488	1,5703	1,9986	2,2841	2,9979	2,7123	2,8908	3,1406	3,1049	3,4618	3,4975	1.26 x10 ⁻⁵
R1AP10S0K5	1,0965	1,3158	1,2061	0,9868	1,4985	1,7909	1,9006	1,7544	1,9736	2,1199	2,3026	1,7178	2.31 x10 ⁻⁵
R1AP10S5K0	0,8373	1,1619	1,4012	1,5379	1,9822	2,0848	2,2556	2,3069	2,4094	2,6828	2,7341	3,0417	1.04 x10 ⁻⁵
Saf epoksi (R2)	0,6175	0,5369	0,8590	0,7517	0,8322	0,6443	0,5369	0,5369	0,6711	0,5638	0,6175	0,6979	1.01 x10 ⁻⁵
R2AP10S0K0	0,6232	1,0284	1,0595	1,6516	1,3711	2,3060	2,274	2,1502	2,2437	2,4929	2,4618	2,5241	1.23 x10 ⁻⁵
R2AP10S0K5	0,9665	0,9967	1,0571	1,0571	1,5101	2,0236	1,7517	1,8725	1,9632	2,0839	2,0236	2,2954	1.00 x10 ⁻⁵
R2AP10S5K0	0,4822	0,9644	1,1940	1,1022	1,4925	1,7910	1,9288	1,9518	2,1584	2,4110	2,5029	2,6866	1.1 x10 ⁻⁵



Şekil 5.7. Sikloalifatik poliamin ile sertleştirilen R1 epoksi reçine kompozit malzemelerin % su sorpsiyon test grafiği



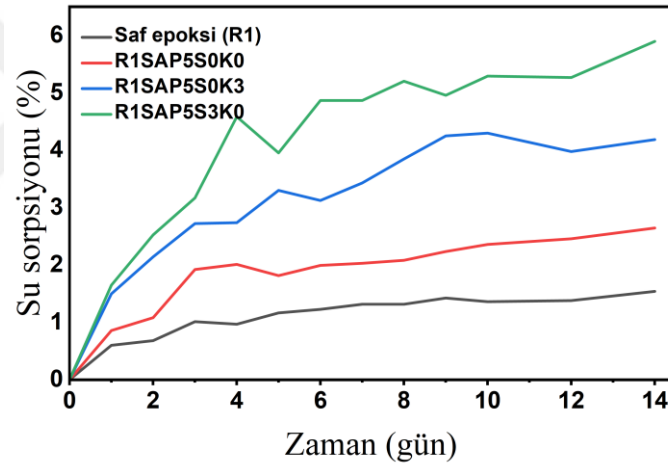
Şekil 5.8. Sikloalifatik poliamin ile sertleştirilen R2 epoksi reçine kompozit malzemelerin % su sorpsiyon test grafiği

SA ile sertleşen iki farklı epoksi reçine (R1 ve R2) kompozit malzemelerin % su sorpsiyon test sonuçları Çizelge 5.6'da verilmiştir. Bu sonuçlar kuru tartım ile başlayıp günlük olarak ve onuncu günden sonra iki gün arayla kütle ölçümleri alınmıştır. R1 ve R2 için elde edilen verilerin % su sorpsiyon grafikleri sırasıyla Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da gösterilmiştir.

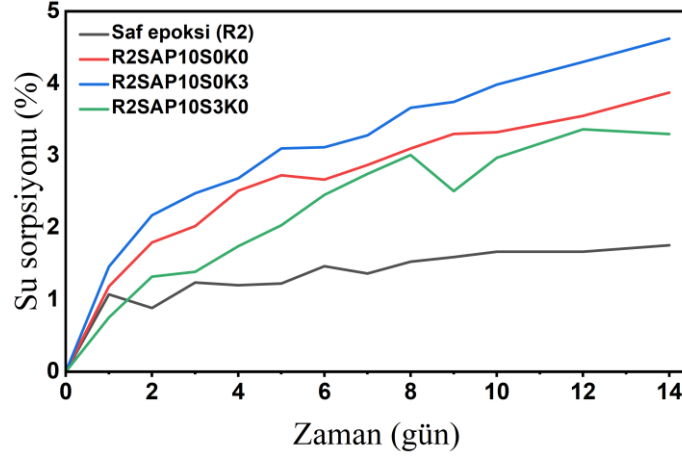
Kompozit malzemelerin su sorpsiyon değerleri zamana bağlı olarak bir artış göstermiştir. Saf epoksi PEG'li ve dolgu madde içeren kompozitlere göre daha az % su sorpsiyonu göstermiştir. PEG moleküllerinin yapısındaki hidroksil grupları, su molekülleriyle etkileşime girerek hidrojen bağları oluşturmuş ve bu durum malzemelerin yüksek miktarda su absorbe etmesine sebep olmuştur. Kompozit malzemelerin % su sorpsiyonu, R1SAP5S0K3 ve R1SAP5S3K0 kompozit malzemeleri için iki haftadan sonra su sorpsiyon değerleri sırasıyla %4,18 ve %5,90 olarak belirlenmiştir. R2SAP10S0K3 ve R2SAP10S3K0 kompozit malzemeleri için ise sırasıyla %4,62 ve %3,30 olarak bulunmuştur.

Çizelge 5.6. SA ile kürlenlen epoksi reçinelerin kompozit malzemelerin % su sorpsiyon test sonuçları (g)

Kompozit	1. gün	2. gün	3. gün	4. gün	5. gün	6. gün	7. gün	8. gün	9. gün	10. gün	12. gün	14. gün	D (mm ² /s)
Saf epoksi (R1)	0,5996	0,6801	1,0112	0,9664	1,1633	1,2259	1,3154	1,3154	1,4228	1,3602	1,3781	1,5392	1.03 x10 ⁻⁵
R1SAP10S0K0	0,8576	1,0809	1,9207	2,0100	1,8135	1,9921	2,0279	2,0814	2,2333	2,3584	2,4567	2,6443	1.11 x10 ⁻⁵
R1SAP10S0K5	1,4969	2,1407	2,7201	2,7362	3,2995	3,1225	3,4283	3,8468	4,2491	4,2974	3,9755	4,1848	1.16 x10 ⁻⁵
R1SAP10S5K0	1,6480	2,5235	3,1672	4,5835	3,9526	4,8667	4,8667	5,2015	4,9569	5,2916	5,2659	5,8967	1.03 x10 ⁻⁵
Saf epoksi (R2)	1,0717	0,8826	1,2357	1,1978	1,2230	1,4626	1,3617	1,5257	1,5887	1,6644	1,6644	1,7526	1.16 x10 ⁻⁵
R2SAP10S0K0	1,1828	1,7921	2,0191	2,5089	2,7240	2,6643	2,8674	3,0944	3,2975	3,3214	3,5484	3,8709	1.08 x10 ⁻⁵
R2SAP10S0K5	1,4570	2,1691	2,475	2,682	3,0963	3,113	3,2784	3,6592	3,7420	3,982	4,2967	4,6196	1.11 x10 ⁻⁵
R2SAP10S5K0	0,7514	1,3184	1,3843	1,7403	2,0303	2,4522	2,7423	3,0059	2,5049	2,9664	3,3619	3,2959	1.34 x10 ⁻⁵



Şekil 5.9. SA ile sertleştirilen R1 epoksi reçine kompozit malzemelerin % su sorpsiyon test grafiği



Şekil 5.10. SA ile sertleştirilen R2 epoksi reçine kompozit malzemelerin % su sorpsiyon test grafiği

R1 içeren malzemelerde su sorpsiyon değerlerinin R2'ye kıyasla daha yüksek olmasının temel nedeni, R1'nin düşük viskozitesinden kaynaklanmaktadır. Düşük viskozite, kütleme sırasında ağ yapısının daha gevşek ve daha az çapraz bağlı oluşmasına neden olur. Bu durum polimer zincirleri arasında daha fazla boşluk (serbest hacim) bırakır ve bu boşluklar su moleküllerinin polimer matrisine daha kolay difüze olmasına imkân tanır. Böylece, R1 bazlı kompozitler daha fazla su absorbe etme eğilimi gösterir.

Buna karşılık, MNA sertleştirici kullanılan sistemlerde su sorpsiyonunun sikloalifatik poliamin içerenlere göre oldukça düşük olmasının nedeni MNA'nın kimyasal ve yapısal kararlılığıdır. MNA, aromatik yapısı sayesinde daha sert ve daha yoğun çapraz bağlı bir ağ oluşturur. Bu yoğun ağ yapısı su moleküllerinin polimer matrisine girmesini büyük ölçüde sınırlar. Sikloalifatik poliamin ise daha esnek yapıda olduğu için daha az çapraz bağlanma sağlar ve zincirler arasında daha fazla boşluk kalır. Bu nedenle sikloalifatik poliamin bazlı sistemler, MNA bazlı sistemlere kıyasla suya karşı daha geçirgen hale gelir.

Sitrik asit içeren sistemlerde su sorpsiyonunun artış göstermesinin başlıca nedeni, sitrik asidin yapısında bulunan çok sayıda karboksil ve hidroksil grubudur. Bu fonksiyonel gruplar hidrofilik özellik taşır ve su molekülleri ile hidrojen bağı kurarak polimer matrisine suyun daha kolay nüfuz etmesine olanak sağlar. Ayrıca sitrik asit, aromatik yapıya sahip MNA'ya kıyasla daha düşük çapraz bağ yoğunluğu oluşturur. Çapraz bağ yoğunluğunun azalması zincirler arasında daha fazla serbest hacim bırakır, bu da su moleküllerinin difüzyonunu kolaylaştırır. Dolayısıyla sitrik asit ile kürlen

epoksi kompozitlerde hem hidrofilik fonksiyonel grupların varlığı hem de görece gevşek ağ yapısı nedeniyle su sorpsiyon değerleri MNA ile kürlenene sistemlere kıyasla daha yüksektir.

Dolgulu epoksi kompozitlerin difüzyon katsayısı, saf epoksiye kıyasla anlamlı bir değişim göstermemiştir. Bu durum, esas olarak dolgu maddesinin zayıf dağılması ve PEG hidrofilik yapısından kaynaklanmaktadır. Topaklanmış dolgu tanecikleri, suyun geçişini kolaylaştıran mikro boşluklar ve zayıf ara yüzey bölgeleri oluşturabilirken; PEG gibi hidrofilik yüzeyleri nem adsorpsiyonunu teşvik etmektedir. Bu etkiler, beklenen bariyer davranışını dengeleyerek, dolgunsuz epoksi ile benzer difüzyon özelliklerinin gözlenmesine neden olmuştur. Literatürde de benzer sonuçlar bulunmuştur (Kaya ve Deveci, 2020b; Bayati ve ark., 2021).

Saçak (2017) bazı polimerlerin su sorpsiyon (%) test sonuçlarını rapor etmiştir (Çizelge 5.7). Elde edilen verilere göre, polimerlerin büyük bir kısmı suya karşı dirençli olup sudan etkilenmemektedir. Örneğin, poli(tetrafloroetilen)in su sorpsiyon oranının sıfır olduğu ifade edilmiştir.

Çizelge 5.7. Bazı polimerlerin su sorpsiyon değerleri (Saçak, 2017)

Polimer	% Su sorpsiyonu
Polikarbonat	0,2
Poliakrilonitril	1,5
Politetrafloroetilen	0
Naylon 6	1,5
Poli(etilen oksit)	0,4
Polietilen	0
Polistiren	0,1

5.5 Çekme Testi

Kompozitlerin kopma uzaması, çekme mukavemeti ve Young modülü gibi mekanik özelliklerini incelemek için çekme testleri kullanılmıştır. İlgili parametreler Ek A Çizelge A 1- Çizelge A 6'da verilmiştir. PEG, tekstil ve kompozit malzemeleri içeren birçok uygulamada yaygın olarak kullanılan bir plastikleştiricidir. EK A Çizelge A 1 ve

Çizelge A 2'den de görüldüğü gibi, PEG tüm oranlarda epoksi reçinesinin çekme mukavemeti ve kopma anındaki uzamasını azaltmıştır. Pek çok araştırma, plastikleştiricilerin bu etkisine dair benzer bulgular bildirmiştir (Liu ve ark., 2007b; Ucpinar Durmaz ve Aytac, 2021).

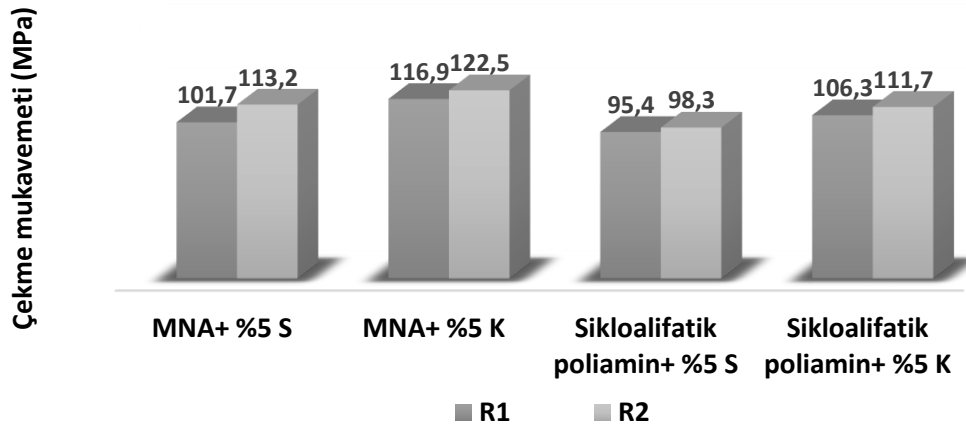
Plastikleştiriciler genellikle polimer sistemine daha fazla serbest hacim kazandırarak zincir hareketliliğinin artmasına ve kompozitte esnekliğin yükselmesine neden olur. Moleküler zincirler, göreceli olarak daha az enerji tüketimiyle hareket edebilir (Zhang ve ark., 2012), bu da şekil hafızası etkisinin artmasına yol açar; böylece epoksi kompozitin deforme olmuş şekli daha düşük sıcaklıklarda geri kazanılabilmektedir. Ancak bu durum, çekme mukavemetinde bir azalmaya neden olabilmektedir (Sun ve ark., 2024). Bu nedenle, şekil hafıza testinde saf epoksiye göre daha esnek olan %10 ağırlık oranında PEG içeren ER karışımı için optimum veriler elde edilmiştir. Bunu göz önünde bulundurarak, şekil hafıza özelliklerinin olumlu yönde etkilendiği görülmüştür.

%1–10 ağırlık oranındaki dolgu maddelerinin etkisini incelemek amacıyla, ağırlıkça %10 oranında PEG kullanılarak kompozitler elde edilmiştir. Sepiyolit veya kolemanit ile takviye edilen kompozitler, EK A Çizelge A 3- Çizelge A 6'da görüldüğü üzere, dolgu varlığında kopma uzamasında artış gözlenmiştir. Bu durum, sepiyolit yapısal özelliklerine atfedilebilir; sepiyolit, özellikle tünellerinin kenarlarında bulunan Si–OH grupları gibi aktif bölgelere sahiptir. Ayrıca, sepiyolit lifsi yapısı geniş çaplı bağlanmaları teşvik eder ve bu da kompozitin mekanik özelliklerini önemli ölçüde artırmaktadır (Ahmetli ve ark., 2012).

5.5.1 Epoksi reçinenin çekme mukavemeti üzerine etkisi

İki farklı epoksi reçine sistemi karşılaştırıldığında, benzer sertleştirici ve dolgu maddesi koşulları altında R2, R1'e kıyasla daha yüksek çekme mukavemeti göstermiştir (Şekil 5.11). Bu farklılığın, iki reçinenin viskozite değerleri arasındaki değişimden kaynaklandığı değerlendirilmektedir (Güzel, 2016). Özellikle düşük viskoziteli R1 reçinesine dolgu madde ilavesi sırasında taneciklerin matris fazı içerisinde tam anlamıyla homojen dağılmaması sonucu meydana gelebilecek yığılmaların, kompozit malzemelerin mekanik performansında olumsuz etkilere neden olmuş olabilir. Standart

bir bisfenol-A bazlı diglisidil eter olan R2'nin anhidrit veya amin bazlı sertleştiricilerle kürlendiğinde yüksek reaktivitesi ve düzgün ağ yapısı sayesinde üstün mekanik performans sunduğu birçok çalışmada bildirilmiştir (Sheng ve ark., 2024). Buna karşılık, düşük viskozite değerine sahip olan R1, daha düşük sertlikte ve daha az çapraz bağ içeren bir yapı oluşturur; bu da çekme dayanımının azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca, R1'in artan zincir esnekliği, uzama kabiliyetini artırmakla birlikte, mukavemetin düşmesine yol açabilir. Bu nedenle, çekme performansı açısından değerlendirildiğinde, R2; sert yapısı ve etkin çapraz bağlanma davranışı sayesinde R1'e göre daha üstündür (Kumar ve ark., 2018).

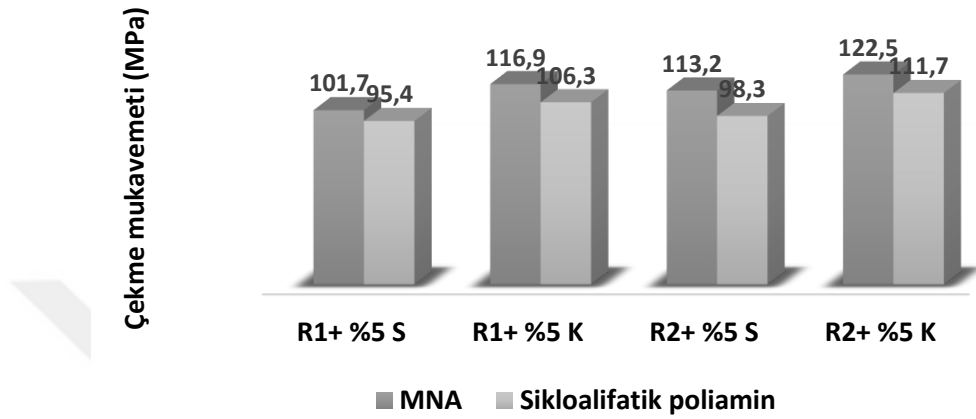


Şekil 5.11. Farklı epoksi reçine kompozitlerinin çekme mukavemeti değerleri

5.5.2 Sertleştirici maddelerinin çekme mukavemeti üzerine etkisi

MNA ve sikloalifatik poliamin sertleştiricileri karşılaştırıldığında, MNA ile kürlenen epoksi kompozitlerin daha yüksek çekme mukavemeti sergilediği gözlemlenmiştir (Şekil 5.12). Bu durum, MNA'nın aromatik yapısından dolayı ve daha yüksek çapraz bağ yoğunluğu oluşturarak daha sert, rijit ve dayanıklı bir üç boyutlu ağ yapısı meydana getirmesinden kaynaklanabilir. Anhidrit bazlı sertleştiriciler, epoksi sistemlerinde, uzun zincirli ve düzenli çapraz bağlarla daha yüksek mekanik performans sağlamaktadır (Zhou ve ark., 2017). Buna karşılık, sikloalifatik poliamin sertleştiriciler daha esnek ağ yapıları oluşturmakta, bu da nihai kompozitin mekanik dayanımını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Ayrıca MNA'nın daha yüksek termal stabilite ve

sertlik sağlması, çekme mukavemetinin artmasında etkili olmaktadır. Sonuç olarak, MNA ile sertleştirilen kompozitler, sikloalifatik poliamin bazlı sistemlere göre çekme dayanımı açısından daha üstün özellikler sunmaktadır.



Şekil 5.12. Farklı sertleştirici kompozitlerinin çekme mukavemeti değerleri

5.5.3 Dolgu maddelerinin çekme mukavemeti üzerine etkisi

Şekil 5.13 ve Şekil 5.14 sırasıyla epoksi reçine R1 ve R2 için a ve b, sırasıyla MNA ve sikloalifatik poliamin ile sertleştirilen sepiyolit ve kolemanit kompozitlerinin dolgu içeriğine bağlı olarak çekme mukavemetini göstermektedir.

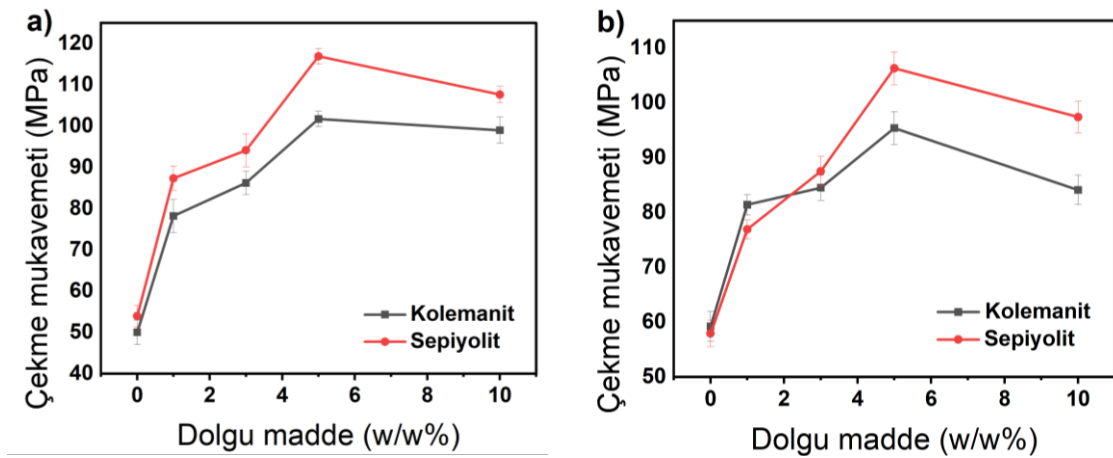
Sepiyolit ve kolemanit içeren kompozitler, saf epoksiye (R1) kıyasla daha yüksek çekme mukavemeti göstermiştir. MNA ile sertleştirilen R1 kompozitler, R1MP10S5K0 ve R1MP10S0K5 saf epoksinin çekme mukavemetini sırasıyla 53,93 MPa ve 50 MPa 'dan 116,9 MPa ve 101,7 MPa 'ya yükseltmiştir. Sikloalifatik poliamin ile sertleştirilen R1 kompozitler ise, R1AP10S5K0 ve R1AP10S0K5 sırasıyla 106,3 MPa ve 95,4 MPa maksimum değere ulaşmıştır.

Ayrıca epoksi reçine R2 aynı sonucu göstermiştir; sepiyolit ve kolemanit içeren kompozitler, saf R2 epoksi sistemine kıyasla daha yüksek çekme mukavemeti sergilemiştir. MNA ile sertleştirilen sistemde, R2MP10S5K0 ve R2MP10S0K5 saf epoksinin çekme mukavemeti sırasıyla 74,2 MPa ve 70,8 MPa değerlerinden 122,5 MPa ve 113,2 MPa değerlerine yükselmiştir. Sikloalifatik poliamin ile sertleştirme durumunda

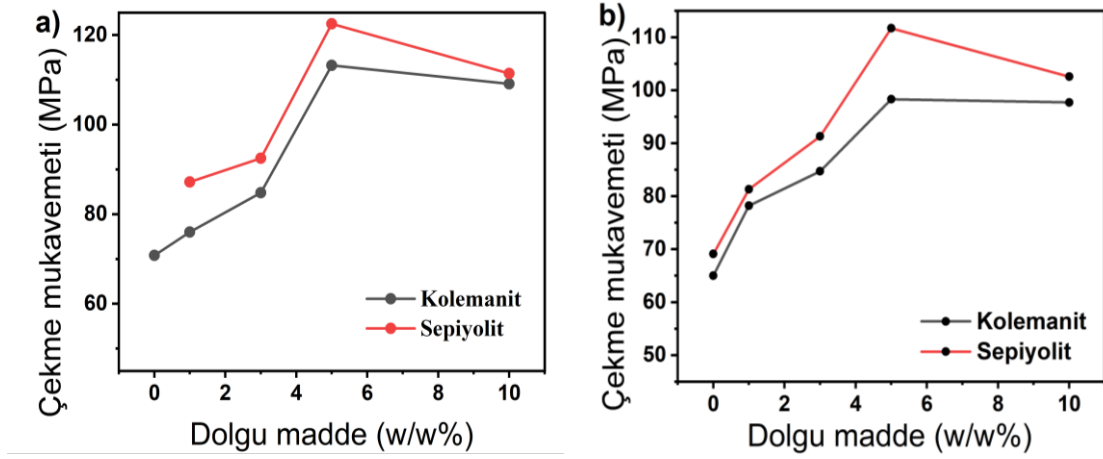
ise, R2AP10S5K0 ve R2AP10S0K5 çekme mukavemeti sırasıyla 111,7 MPa ve 98,3 MPa maksimum değerlere ulaşmıştır.

Kolemanit kıyasla, Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'te gösterildiği gibi sepiyolit takviyeli epoksi kompozitler tüm dolgu konsantrasyonlarında daha yüksek çekme mukavemeti sergilemiştir. Bu iyileşme, öncelikle sepiyolit lifsi morfolojisi ve yüksek boy/en oranı sayesinde gerilmenin daha etkin bir şekilde aktarılmasını sağlaması ve epoksi matrisi ile daha güçlü ara yüzey etkileşimi oluşturmaktan kaynaklanmaktadır (Tian ve ark., 2019). Ayrıca, sepiyolit yüzeyinde bulunan bol miktardaki hidroksil (Si-OH) grupları, polimer zincirleri ile kimyasal etkileşimi artırmakta; bu durum, daha homojen bir dağılım sağlamak ve aglomerasyonu azaltmaktadır. Buna karşılık, daha kristal yapılı ve granüler morfolojiye sahip olan kolemanit, özellikle daha yüksek oranlarda kullanıldığında kolayca aglomere olabilmekte ve bu da takviye etkisini sınırlamaktadır (Kutuk, 2024). Sonuç olarak, sepiyolit, epoksi kompozitlerde kolemanite kıyasla daha üstün bir mekanik güçlendirme etkisi göstermektedir.

Ancak, dolgu oranı %5'in üzerine çıktığında, dolgu maddelerinin aglomerasyonu gelişebilir ve bu da çekme mukavemetinde azalmaya yol açabilmektedir. Başka bir deyişle, dolgu ile matris arasındaki zayıf ara yüzey yapışması, kompozitlerin çekme mukavemetinin azalmasından sorumlu olabilmektedir (Hardinnawirda ve Aisha, 2012; Ozsoy ve ark., 2015). Bu sonuçlara göre, optimum dolgu madde içeriği %5 olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.13. Farklı dolgu madde oranları a) MNA ve b) sikloalifatik poliamin ile sertleştirilen R1 kompozitlerinin çekme mukavemeti değerleri



Şekil 5.14. Farklı dolgu madde oranları a) MNA ve b) sikloalifatik poliamin ile sertleştirilen R2 kompozitlerinin çekme mukavemeti değerleri

5.6 Termal Özellikleri

İki farklı epoksi reçinesinin (R1 ve R2) kompozitlerinin MNA, sikloalifatik poliamin ve SA ile kürlenmiş hallerine ait DSC termogramları EK-B Şekil B 1 -Şekil B 6'da sunulmuştur. DSC analizinden elde edilen T_g Çizelge 5.8'de özetlenmiştir.

PEG'nin eklenmesiyle birlikte T_g değerinde bir azalma gözlemlenmiştir; bu durum, PEG moleküllerinin kompozit içerisindeki güçlü ve homojen bağları bozarak heterojen bağların oluşumuna neden olduğunu göstermektedir. Bu yapısal değişim, kompozit içerisindeki moleküler hareketliliği artırmış ve sonuç olarak T_g değerinin düşmesine yol açmıştır (Nedaipour ve ark., 2020; Ghallemohamadi ve ark., 2023; Kumar ve ark., 2023).

Literatürde, dolgu maddesine bağlı olarak bazı kompozitlerde T_g değerinde artış gözlemlenirken (Jin ve Park, 2012), bazı çalışmalarda ise hafif bir azalma rapor edilmiştir (Sun ve ark., 2004; Burda ve ark., 2021; Najmi ve Hu, 2023). Bu çalışmada, MNA ile kürlenen epoksi R1'in T_g değeri, R1MP10S5K0 ve R1MP10S0K5 için sırasıyla 85 °C'den 44,5 °C ve 49,5 °C'ye düşmüştür. Sertleştirici olarak sikloalifatik poliamin kullanıldığında, R1AP10S5K0 ve R1AP10S0K5 kompozitlerinin T_g değerleri sırasıyla 47,8 °C ve 48,3 °C olarak belirlenmiştir. SA kullanıldığında ise R1SAP5S3K0 ve R1SAP5S0K3 kompozitlerinin T_g değerleri sırasıyla 48,5 °C ve 49,2 °C olarak belirlenmiştir. MNA ile kürlenen diğer epoksi R2'nin T_g değeri, R2MP10S5K0 ve R2MP10S0K5 için sırasıyla 90,4 °C'den 47,2 °C ve 52,7 °C'ye düşmüştür. Sertleştirici

olarak sikloalifatik poliamin kullanıldığında, R2AP10S5K0 ve R2AP10S0K5 kompozitlerinin T_g değerleri sırasıyla 50,4 °C ve 51,5 °C olarak belirlenmiştir. SA kullanıldığında ise R2SAP10S3K0 ve R2SAP10S0K3 kompozitlerinin T_g değerleri sırasıyla 43,7 °C ve 51,3 °C olarak belirlenmiştir. T_g değerindeki bu azalma, kompozit yapısında bulunan PEG moleküllerine atfedilebilmektedir.

Çizelge 5.8. Kompozit malzemelerin T_g değerleri

Epoksi reçine	Sertleştirici	Numune	T_g (°C)
R1	MNA %30	Saf epoksi (R1)	85
		R1MP10S0K0	53,8
		R1MP10S5K0	44,5
		R1MP10S0K5	49,5
	Sikloalifatik poliamin %25	Saf epoksi (R1)	60,8
		R1AP10S0K0	50,6
		R1AP10S5K0	47,8
		R1AP10S0K5	48,3
	SA %25	Saf epoksi (R1)	49,4
		R1SAP5S0K0	46,0
		R1SAP5S3K0	48,5
		R1SAP5S0K3	49,2
R2	MNA %30	Saf epoksi (R2)	90,4
		R2MP10S0K0	53,2
		R2MP10S5K0	47,2
		R2MP10S0K5	52,7
	Sikloalifatik poliamin %25	Saf epoksi (R2)	81
		R2AP10S0K0	51,1
		R2AP10S5K0	50,4
		R2AP10S0K5	51,5
	SA %25	Saf epoksi (R2)	52,7
		R2SAP10S0K0	43,9
		R2SAP10S3K0	43,7
		R2SAP10S0K3	51,3

Aynı koşullarda kürlenmiş saf R1 ve R2 reçinelerinin T_g 'leri karşılaştırıldığında, R1'in T_g değerinin R2'ye göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu fark, reçinelerin kimyasal yapılarından kaynaklanmaktadır. R2, R1'e kıyasla daha yüksek epoksi eşdeğer ağırlığına ve daha sert bir moleküler iskelete sahiptir; bu da daha yoğun ve termal olarak daha kararlı bir ağ yapısının oluşmasını sağlamaktadır. Ayrıca sertleştiricilerin etkisi incelendiğinde, MNA ile kürlenmiş sistemlerin T_g değerleri, sikloalifatik poliamin ile kürlenmişlere göre daha yüksek bulunmuştur. Bunun nedeni, aromatik yapıya sahip olan MNA'nın daha yüksek çapraz bağ yoğunluğu oluşturması ve zincir segmentlerinin hareketliliğini sınırlandırmasıdır. Öte yandan, aminler, yapıya daha esnek alifatik

segmentler kattığından moleküler hareketliliği artırır ve bu da T_g 'nin düşmesine neden olur. Bu bulgular, epoksi sistemlerinin termal özelliklerinin hem reçine yapısı hem de sertleştiricilerin kimyasal özellikleri tarafından önemli ölçüde belirlendiğini vurgulayan literatürle uyumludur (Pal ve ark., 2010; Mağa ve ark., 2015).

5.7 Yanma Testi

R1 epoksi reçine kompozitlerin UL 94 yanıcılık testine ait bulgular Çizelge 5.9'da sunulmuştur. Sikloalifatik poliamin ile kürlenmiş saf epoksi (R1) ve PEG içeren kompozit herhangi bir sınıflandırma alamamıştır. Ancak, epoksiye R1AP10S5K0 ve R1AP10S0K5 kompozitlerin alev geciktirici özelliklerini iyileştirdiği açıkça görülmüştür. Öte yandan, MNA ile kürlenmiş kompozitler, UL 94 testinde en iyi yanmazlık sınıfı olan V-0 seviyesine ulaşmıştır (Kaya ve Deveci, 2020a; Zakut ve Kızılcan, 2022). Ayrıca, sepiyolit içeren kompozitler daha kısa yanma süresi sergilemiştir.

Çizelge 5.9. Kompozit malzemelerin alev geciktirici özellikleri

Epoksi reçine	Sertleştirici	Numune	Damlama	Sınıflandırma
R1	MNA %30	Saf epoksi (R1)	Yok	V0
		R1MP10S0K0	Yok	V0
		R1MP10S5K0	Yok	V0
		R1MP10S0K5	Yok	V0
	Sikloalifatik poliamin %25	Saf epoksi (R1)	Yok	Sınıflandırma yok
		R1AP10S0K0	Yok	Sınıflandırma yok
		R1AP10S5K0	Yok	V0
		R1AP10S0K5	Yok	V0

5.8 Şekil Hafıza Testi

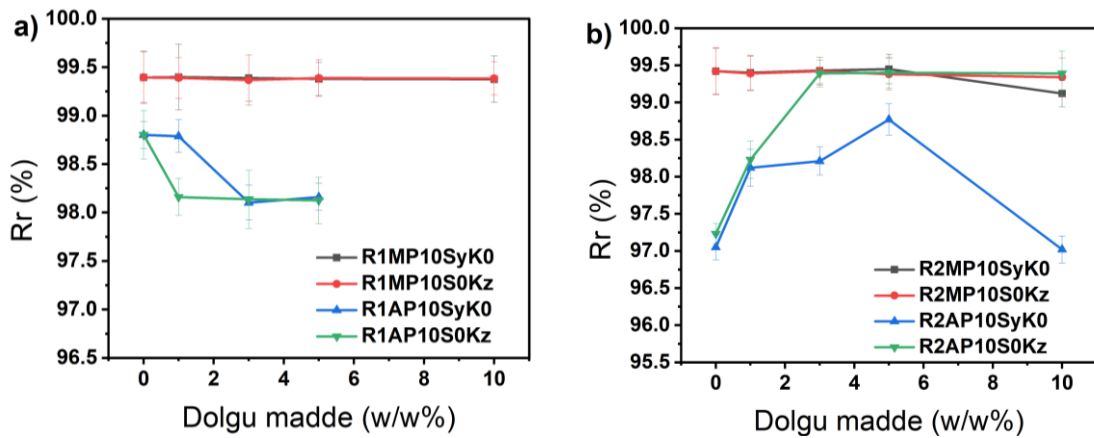
Çekme testinden görüldüğü gibi dolgu maddesi ilavesiyle mekanik özelliklerin geliştiği görülmektedir. Bu gelişimlerin, polimer matrisi ile mineral dolgu maddesi arasındaki etkileşimden kaynaklandığı ve bu etkileşimin şekil hafızalı kompozitlerin dayanıklılığını artırabileceği belirtilmektedir (Zhang ve ark., 2012; Li ve ark., 2023). Ayrıca, bu dolgu maddeleri epoksi reçine kompozitlerin T_g değerini azaltmıştır. Kompozitin şekil hafıza davranışı, T_g değerinin değiştirilmesiyle belirli uygulamaların

gereksinimlerine uyarlanabilmektedir. Bununla birlikte, bu katkı maddeleri genellikle kompozitlerin termal kararlılığını da artırmaktadır. Kompozitler en iyi yanmazlık sınıfına ulaşarak, yüksek sıcaklık koşullarında malzemenin güvenlik profilini geliştirmektedir (Dağ ve ark., 2022).

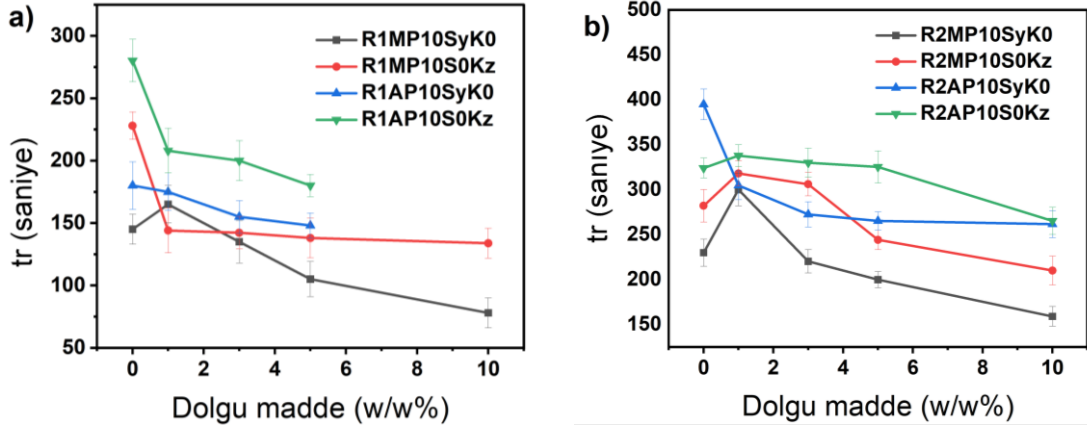
5.8.1 MNA ve sikloalifatik poliamin içeren kompozitler

5.8.1.1 Dolgu maddelerinin şekil hafıza özellikleri üzerine etkisi

Farklı dolgu madde miktarı kullanılarak kompozitlerin şekil geri kazanım oranı ve süresi sırasıyla Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'da gösterilmiştir. İnce dağılmış dolgu maddesinin kullanımı, deformasyon süreci sırasında oluşan gerilmeyi önemli ölçüde artırmıştır. Bu durum, epoksi matrisi ile dolgu maddesi arasındaki moleküler etkileşimlerin daha iyi olmasından kaynaklanmaktadır. Şekil geri kazanım süre değerleri, dolgu maddesi miktarının artmasıyla birlikte olumlu bir etki göstermiştir (şekil geri kazanım süre değerleri EK C Çizelge C 1- Çizelge C 8'de gösterilmiştir). Bu olumlu etki, şekil hafıza etkisinde önemli rol oynayan çekme dayanımındaki artışa bağlanmıştır. Ancak bu olumlu etki, dolgu madde oranı %10'un üzerine çıktığında mekanik özellikleri azalmıştır. Bu azalma, sepiyolit nanoliflerinin topaklanması (agregasyonu) ve kolemanitin pul pul ayrılması (eksfolyasyonu) ile açıklanmaktadır (Zhan ve ark., 2015; Guzel ve ark., 2016). Bu nedenle optimum dolgu maddesi miktarı ağırlıkça %5 olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.15. Farklı dolgu madde miktarı kullanılarak kompozitlerin şekil geri kazanım oranı a) R1 ve b) R2



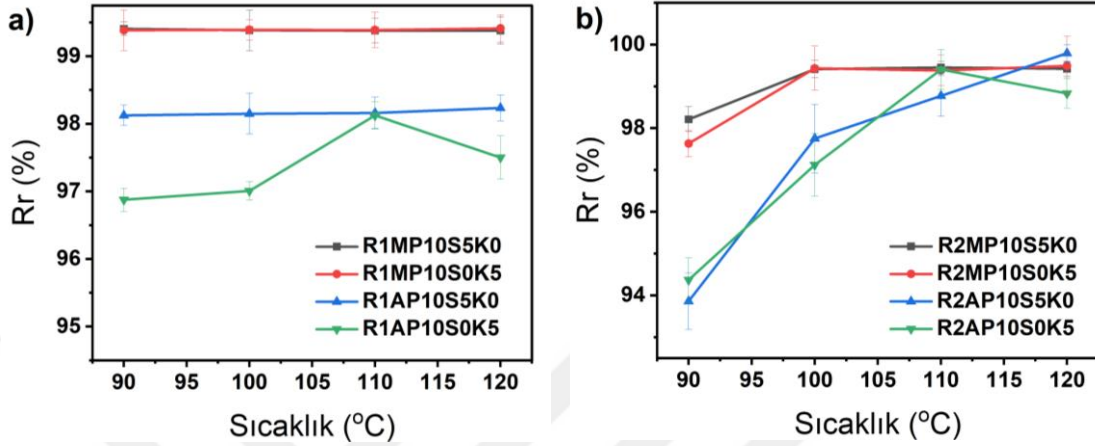
Şekil 5.16. Farklı dolgu madde miktarı kullanılarak kompozitlerin şekil geri kazanım süresi a) R1 ve b) R2

5.8.1.2 Sıcaklığın şekil hafıza özellikleri üzerine etkisi

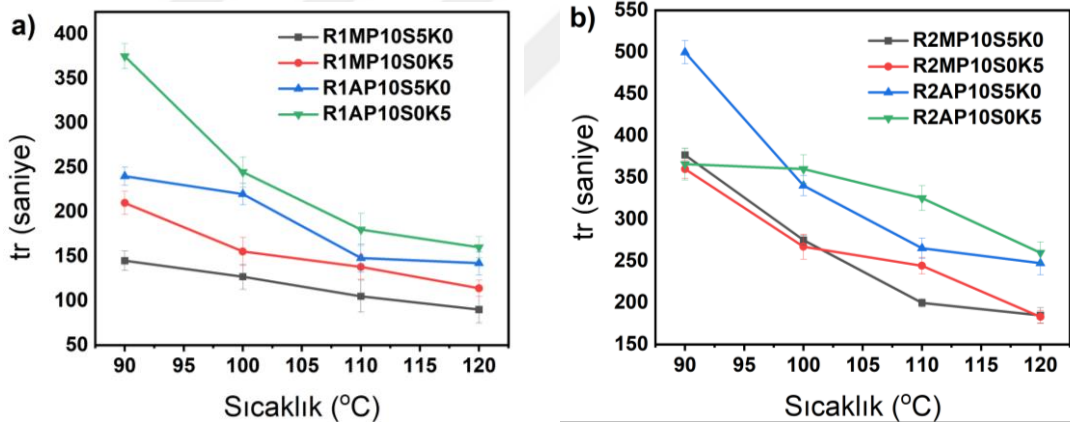
Farklı epoksi reçineleri (R1 ve R2) ile farklı dolgu maddeleri (sepiyolit ve kolemanit) kullanılarak hazırlanan kompozitlerin şekil hafıza özellikleri üzerine sıcaklığın etkisinin incelenmesi ve optimum sıcaklığın belirlenmesi amacıyla, bu çalışmada şekil hafıza testleri 90, 100, 110 ve 120 °C sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Farklı sıcaklıklarda elde edilen şekil geri kazanım oranı ve geri kazanım süreleri değerleri sırasıyla Şekil 5.17 ve Şekil 5.18’de gösterilmiştir. Sıcaklık değerleri artışı ile şekil geri kazanım oranı az ölçüde değişme göstermektedir. Sıcaklık arttıkça geri kazanım süresinin azaldığı gözlemlenmiştir.

Epoksi kompozitler, sıcaklık ve dolgu oranındaki artışla birlikte daha hızlı bir şekil geri kazanım tepkisi göstermiş ve geri kazanım süresi bir azalma sergilemiştir. Ayrıca, sıcaklık artışıyla birlikte geri kazanım oranında önemli bir değişim gözlemlenmemiştir. Bu durumu, testlerin T_g ’nin üzerinde gerçekleştirilmiş olmasına bağlanabilir; çünkü T_g ’nin üzerindeki sıcaklıklar, geri kazanım oranı üzerinde önemli bir etki oluşturmaz. Benzer bulgular literatürde yer alan diğer çalışmalarda da bildirilmiştir (Şengör, 2013). Daha önce sunulan sonuçlar göz önüne alındığında, en düşük geri kazanım süresine ulaşmak amacıyla daha yüksek sıcaklıklarda çalışmanın mantıklı olduğu görülmektedir. Bu bağlamda, optimum sıcaklık 110 °C olarak belirlenmiş ve bu koşul, epoksi kompozitler için şekil hafıza döngülerinin gerçekleştirilmesinde kullanılmıştır.

Tüm kompozitlerin farklı sıcaklıklardaki şekil hafıza özelliklerine dair detaylar EK C Çizelge C 1- Çizelge C 8'de verilmiştir. Ayrıca, kompozitlerin sabit şekilleri de Şekil C 1- Şekil C 8'de sunulmuştur.



Şekil 5.17. Farklı sıcaklıklarda kompozitlerin şekil geri kazanım oranı a) R1 ve b) R2

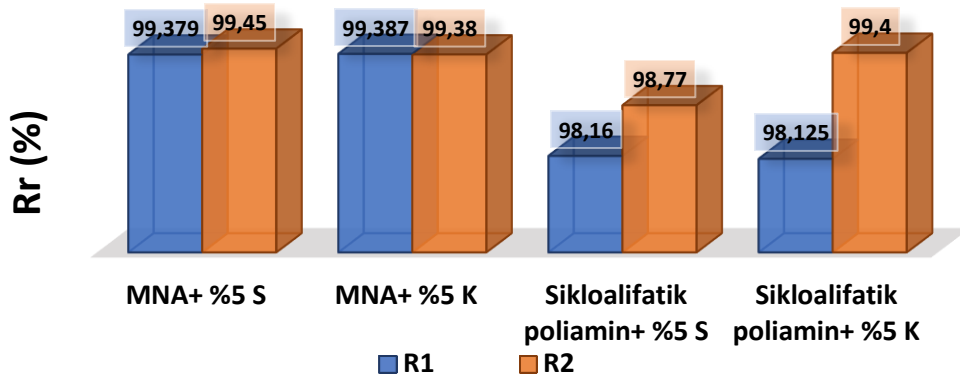


Şekil 5.18. Farklı sıcaklıklarda kompozitlerin şekil geri kazanım süresi a) R1 ve b) R2

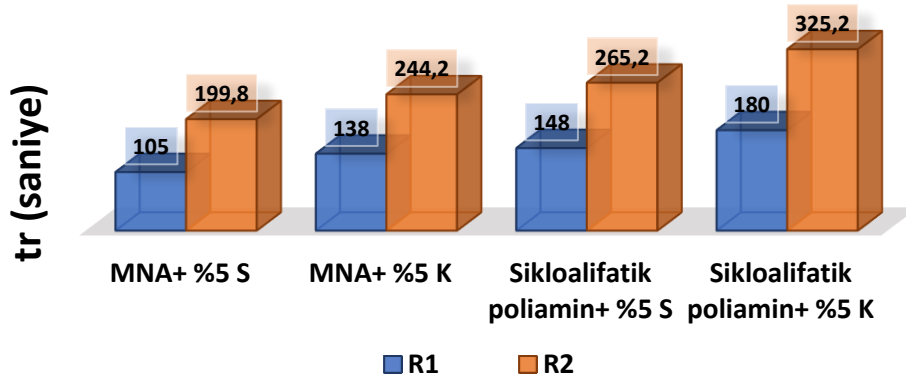
5.8.1.3 Epoksi reçinenin şekil hafıza özellikleri üzerine etkisi

Epoksi reçineleri R2 ve R1 karşılaştırıldığında, R2'nin R1'e kıyasla az bir yüksek şekil geri kazanım oranına (R_r) sahip olduğu bulunmuştur (Şekil 5.19). Bu gelişmiş şekil hafıza performansı, R2'nin daha yüksek sertliğine ve çapraz bağ yoğunluğuna atfedilebilir, bu da mekanik özellikleri iyileştirmektedir. Bu yapı, deformasyon sırasında daha fazla iç gerilim depolamasına ve ısıtma ile birlikte bu enerjiyi daha etkili bir şekilde serbest bırakmasına olanak tanımaktadır (Meng ve Hu, 2009). Şekil hafızalı polimerlerde

yüksek çapraz bağ yoğunluğu, programlama aşamasında zincir hareketliliğini kısıtlayarak ve geri kazanım sırasında daha güçlü bir itici kuvvet sağlayarak geri kazanım oranlarını artırır. Buna karşılık, daha düşük çapraz bağ yoğunluğuna sahip olan R1, daha esnek bir yapıya sahiptir ve daha hızlı bir geri kazanım süresi gösterir (Şekil 5.20); ancak daha düşük R_r değerine sahiptir çünkü depolanan elastik enerji daha azdır ve bu da eksik şekil geri dönüşüne neden olur. Sertlik ile geri kazanım hızı arasındaki bu ters ilişki belgelenmiştir. Daha sert sistemler genellikle daha doğru şekil geri kazanımı sağlar, ancak daha yavaş ısı dağılımı ve zincir gevşemesi nedeniyle daha uzun aktivasyon süreleri gerektirir. Bu nedenle, R2, yüksek doğrulukta şekil hafıza performansı gerektiren uygulamalar için avantaj sağlarken; R1, hızlı tepkinin öncelikli olduğu durumlarda, geri kazanım hassasiyetinden bir miktar ödün verilmesi koşuluyla tercih edilebilir.



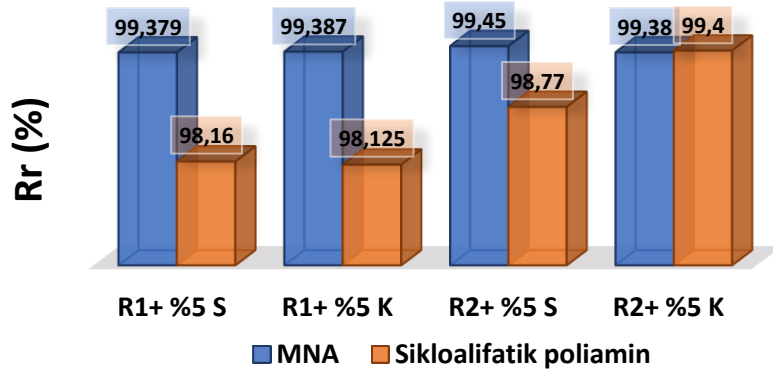
Şekil 5.19. Farklı epoksi reçine kullanılarak elde edilen kompozitlerin şekil geri kazanım oranı



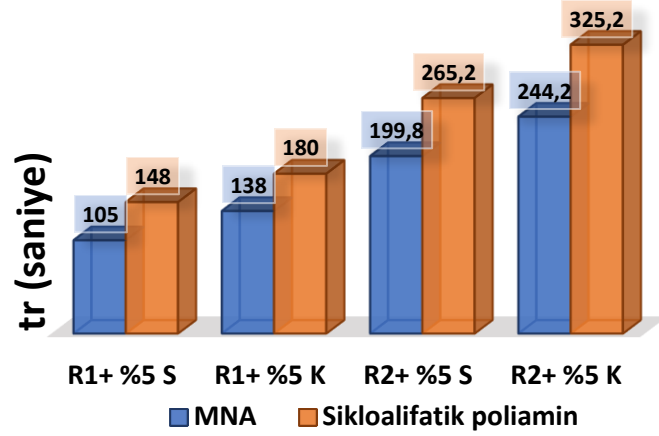
Şekil 5.20. Farklı epoksi reçine kullanılarak elde edilen kompozitlerin şekil geri kazanım süresi

5.8.1.4 Sertleştirici maddelerinin şekil hafıza özellikleri üzerine etkisi

Ağırlıkça %5 oranında dolgu maddesi içeren kompozitler, şekil geri kazanımı açısından mükemmel bir performans sergilemiş ve 110 °C'de MNA ile kürlenene sistemde %99'un, sikloalifatik poliamin ile kürlenene sistemde ise %98'in üzerinde geri kazanım oranı (R_r) elde edilmiştir (Şekil 5.21). Sepiyolit ve kolemanit ER 170 ve ER 128 epoksi reçine kompozitlerinin geri kazanım süreleri, MNA ile kürlendiğinde sırasıyla 105, 138, 199,8 ve 244,2 saniye, sikloalifatik poliamin ile kürlendiğinde ise 148, 180, 165,2 ve 325,2 saniye olarak belirlenmiştir (Şekil 5.22). MNA ile sertleştirilmiş kompozitlerin geri kazanım süresi, sikloalifatik poliamin ile sertleştirilmiş kompozitlerine göre daha kısa bulunmuştur; bu durum, MNA'nın daha iyi mekanik özelliklere ve çekme dayanımına sahip olmasıyla açıklanabilir. Ayrıca, sikloalifatik poliamin'in MNA'ya göre daha düşük termal kararlılığa sahip olduğu görülmüştür ve bu şekil hafıza davranışını olumsuz etkileyebilir. Bu bulgu literatürde de benzer şekilde rapor edilmiştir (Işık ve Ahmetli, 2024).



Şekil 5.21. Farklı sertleştiriciler kullanılarak elde edilen kompozitlerin şekil geri kazanım oranı



Şekil 5.22. Farklı sertleştiriciler kullanılarak elde edilen kompozitlerin şekil geri kazanım süresi

5.8.2 SA içeren kompozitler

5.8.2.1 Sertleştirici madde oranının şekil hafıza özellikleri üzerine etkisi

Bu çalışmada, sitrik asit ile kürlenene R1 epoksi reçinesi kullanılarak farklı oranlarda (Kütlece %18,25, %20, %25 ve %30) hazırlanan şekil hafızalı epoksi kompozitlerin davranışı incelenmiştir. Termo-duyarlı şekil hafızalı polimerlere özgü olarak, sıcaklık arttıkça zincir hareketliliği artmış ve buna bağlı olarak şekil hafıza geri kazanım oranı (R_r) yükselmiştir. T_g 'nin üzerine çıkıldığında, polimer ağı camsı benzeri sert bir yapıdan kauçuğu esnek bir yapıya geçer (Geethamma ve Drupitha, 2024); bu da depolanmış elastik enerjinin serbest kalmasını ve orijinal şekle geri dönüşü mümkün kılmaktadır (Yu ve ark., 2012).

Ancak, geri kazanım sürecinde bazı numunelerde sıcaklığa bağlı olarak kırılma gözlemlenmiştir. Özellikle %18,25, %20 ve %30 sitrik asit içeren numuneler sırasıyla 100 °C, 110 °C ve 120 °C'de kırılmıştır. Bu durum, yetersiz veya aşırı çapraz bağlanmanın, ısı gerinim altında yapısal bütünlüğü olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir (Liu ve ark., 2010).

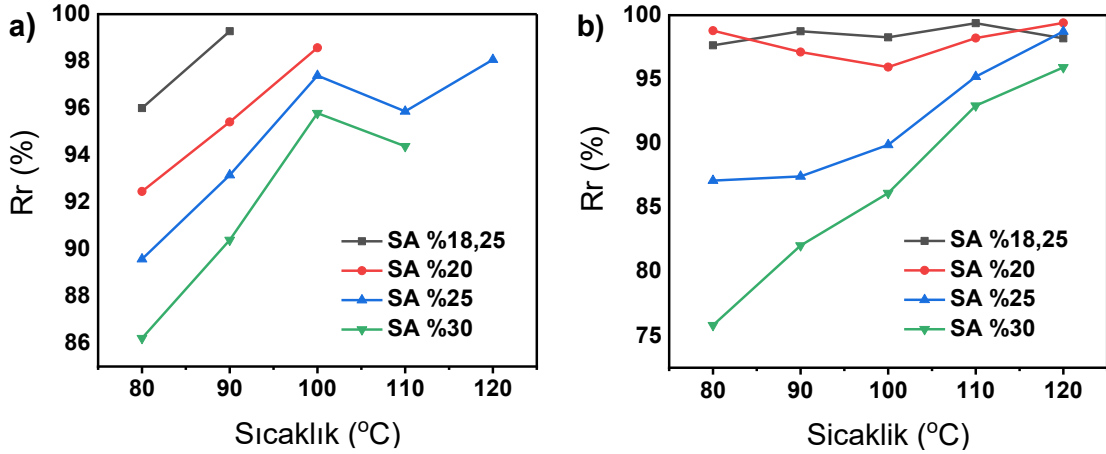
Buna karşılık, %25 sitrik asit içeren numune tam şekil geri kazanımı gerçekleştirmiş ve kırılma gözlemlenmemiştir. Bu sonuç, bu oranın çapraz bağ yoğunluğu ile zincir esnekliği arasında dengeli bir yapı sağladığını göstermiştir. %25 SA içeriği, ısıl deformasyona karşı yeterli dayanım sağlayacak düzeyde çapraz bağlanma

oluştururken, moleküler gevşemeye izin verecek kadar esnek bir ağ yapısını da korumuştur. Bu durum, sertleştirici oranının dikkatli bir şekilde optimize edilmesinin mekanik bozulmayı önlemede ve etkin şekil hafızası performansı elde etmede kritik olduğunu ortaya koymaktadır.

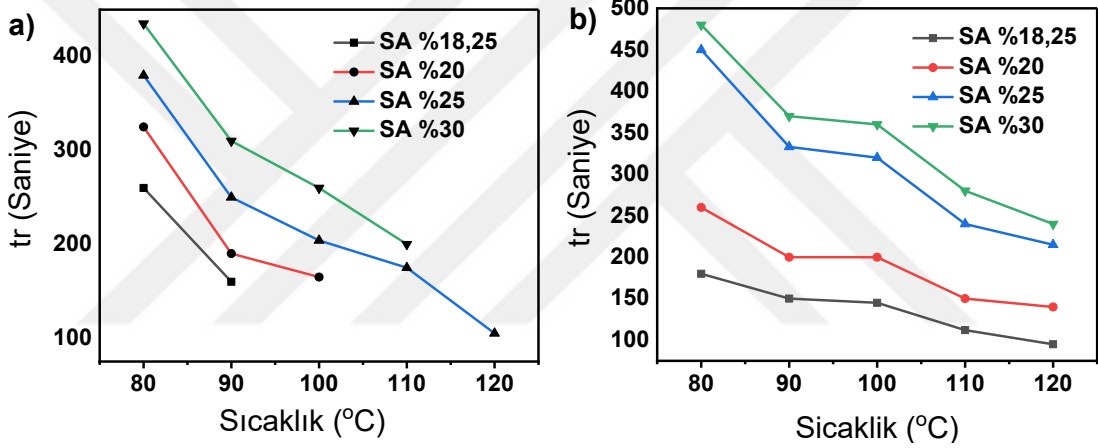
Kompozit sistemin esnekliğini ve ısıl dayanımını artırmak amacıyla, yumuşak segment olarak PEG eklenmiş; ayrıca kolemanit ve sepiyolit gibi inorganik dolgu malzemeleri kullanılmıştır. Bu katkı maddeleri, epoksi matrisini güçlendirmeyi, ısıl bozulmayı geciktirmeyi ve geri kazanım sırasında oluşan iç gerilmeleri daha homojen dağıtarak kırılma riskini azaltmayı hedeflemiştir. Ancak, bu iyileştirmelerin etkinliği aynı zamanda kullanılan epoksi reçinesinin türüne de bağlıdır.

R1 reçinesine ek olarak, karşılaştırma amacıyla ikinci bir epoksi reçinesi olan R2 de kullanılmıştır. Dikkat çekici bir şekilde, R2 esaslı hiçbir numunede geri kazanım sırasında kırılma meydana gelmemiştir. Bu üstün performans, R2'nin sitrik asit ile daha homojen bir kürleşme reaksiyonu göstermesiyle açıklanabilir. Ayrıca, R2 genellikle daha sünek bir matris oluşturarak, ısıl geri kazanım sırasında oluşan iç gerilmeleri daha iyi absorbe edebilmekte ve dağıtabilmektedir.

Bu bulgular, şekil hafızalı epoksi kompozitlerin tasarımında epoksi reçine seçimi, sertleştirici oranı ve dolgu malzemesi kombinasyonunun belirleyici rolünü vurgulamaktadır. Özellikle %25 sitrik asit içeren optimize edilmiş formülasyon, mekanik bütünlükten ödün vermeden yüksek şekil geri kazanımı sağlama potansiyeline sahiptir. Farklı sitrik asit oranları ile kürlenmiş iki farklı epoksi (a) R1 ve (b) R2 sıcaklık ile şekil geri kazanım oranı ve süresi sırasıyla Şekil 5.23 ve Şekil 5.24'te gösterilmiştir. Daha detaylı şekil hafıza özelliklerinin değerleri EK C Çizelge C 9 ve Çizelge C 10'da verilmiştir ve şekil sabitleri Şekil C 9 ve Şekil C 10'da gösterilmiştir.



Şekil 5.23. Farklı sitrik asit oranları ile kürlenene (a) R1 ve (b) R2 kompozitlerinin sıcaklık ile şekil geri kazanım oranı ilişkisi



Şekil 5.24. Farklı sitrik asit oranları ile kürlenene (a) R1 ve (b) R2 kompozitlerinin sıcaklık ile şekil geri kazanım süresi ilişkisi

5.8.2.2 PEG oranının şekil hafıza özellikleri üzerine etkisi

PEG ilavesinde, SA ile kürlenene epoksi kompozitlerin şekil hafıza performansını önemli ölçüde iyileştirmiştir. Epoksi karışımına PEG ilavesi, T_g 'nin düşmesine ve kristallik derecesinin artmasına neden olmuştur (Sringam ve ark., 2025). Bu durum, zincir hareketliliğini ve yapısal yeniden düzenlenmeyi kolaylaştırmış; dolayısıyla, epoksi/PEG karışımının şekil sabitleme ve geri kazanım özelliklerini geliştirmiştir. PEG, yumuşak ve esnek bir segment olarak işlev görerek epoksi ağ yapısındaki zincir hareketliliğini artırmış ve sistemin elastikiyetine katkı sağlamıştır. Bu yapısal değişiklik, şekil geri kazanım süresinde belirgin bir azalmaya neden olmuş; polimer zincirlerinin

ısıtıldığında daha hızlı bir şekilde gevşeyerek orijinal yapılarına dönmelerini mümkün kılmıştır. PEG miktarının artırılmasıyla bu etki daha da belirginleşmiş; ağ içerisinde daha fazla esnek alanın oluşması, gerilimin daha hızlı salınımına olanak tanımıştır. Ayrıca, sıcaklığın artırılması da zincir hareketliliğini hızlandırarak geri kazanım süresini daha da kısaltmıştır.

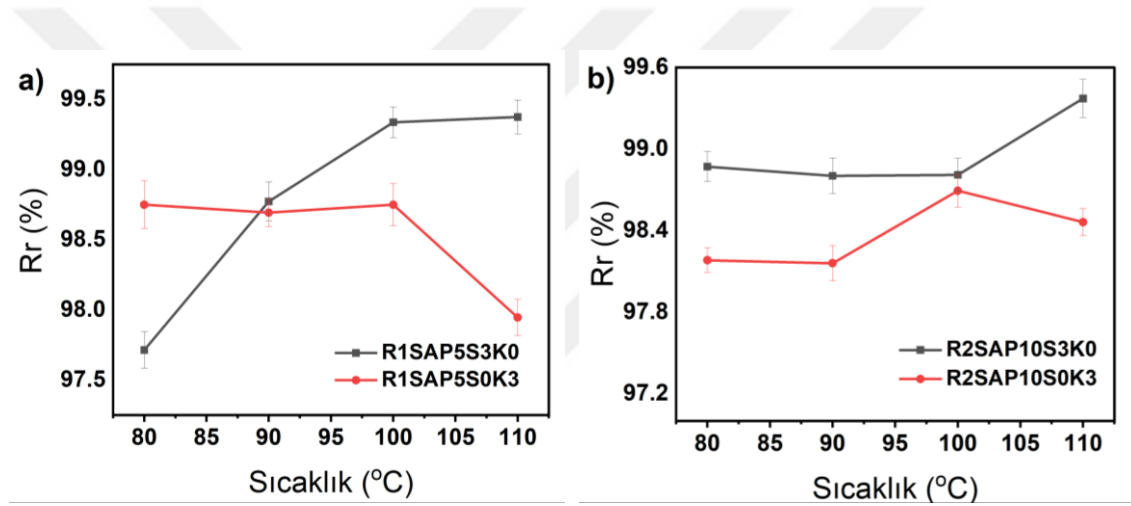
Her iki epoksi reçinesi için, esneklik ile mekanik bütünlük arasında denge sağlamak amacıyla optimum PEG oranı belirlenmiştir. R1 sistemi için (w/w) %5 PEG en etkili oran olarak belirlenmiş. Buna karşılık, R2 esaslı sistemi, daha yüksek PEG içeriğini tolere edebilmiş ve bundan fayda sağlamıştır; (w/w) %10 PEG ile en iyi performans elde edilmiştir. Genel olarak, PEG içeriği ile sıcaklık artışının birleşik etkisi, her iki sistemde de daha hızlı, daha verimli ve daha kararlı bir şekil hafıza davranışı ortaya koymuştur. Detaylar EK C Çizelge 11 ve çizelge 12'de gösterilmiştir. Ayrıca şekil sabitleri Şekil C 11 ve Şekil C 12'de gösterilmiştir.

5.8.2.3 Dolgu maddelerinin şekil hafıza özellikleri üzerine etkisi

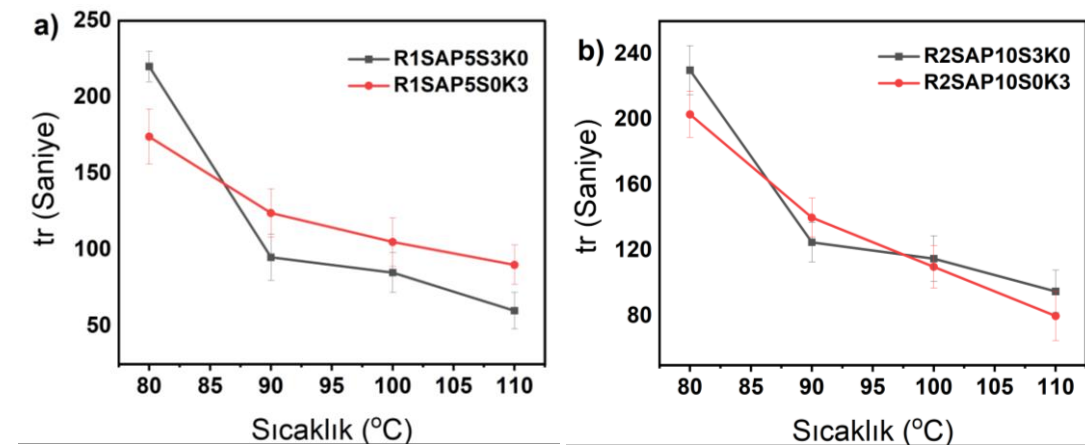
Kolemanit ve sepiyolit dolgu malzemesi olarak ilavesi epoksi esaslı şekil hafızalı kompozitlerin yapısal ve fonksiyonel performansını önemli ölçüde artırmıştır. Bor içeriği yüksek bir mineral olan kolemanit, yalnızca ağ yapısının termal kararlılığını artırmakla kalmamış, aynı zamanda bir mekanik takviye edici olarak görev yaparak kurlenmiş matrisin dayanımını da güçlendirmiştir. Kolemanit ve sepiyolit, geri kazanım sürecinde oluşan iç gerilmeleri daha homojen bir şekilde dağıtarak, çatlak veya kırılmaya yol açabilecek yerel gerilim birikimlerini önlemiştir. Bu durum, özellikle yüksek sıcaklıklarda kırılma gözlemlenen dolgu maddesi olmayan numunelerle karşılaştırıldığında açıkça ortaya çıkmıştır. Buna karşılık, dolgu maddesi içeren formülasyonlarda kırılma gözlemlenmemiştir, bu da dolgu maddenin deformasyon ve geri kazanım sırasında epoksi ağ yapısını destekleyerek sistemin tokluğunu ve şekil hafıza güvenilirliğini artırdığını göstermektedir.

Ayrıca, dolgu madde ilavesi ile şekil hafıza davranışı üzerinde olumsuz bir etki yaratmamış; bazı durumlarda daha kararlı ve tekrarlanabilir bir geri kazanım tepkisi elde edilmesine katkı sağlamıştır. Bu sonuçlar, dolgu maddesi içeren şekil hafızalı epoksi kompozitlerde hem dayanıklılığı hem de fonksiyonel performansı artıran çok işlevli bir

katkı malzemesi olarak etkili bir rol oynadığını doğrulamaktadır. (w/w) %3 dolgu maddesi optimum oran olarak seçilmiştir. Farklı sıcaklıklarda şekil geri kazanımı kompozitler için %97 ve %99 arasında bulunmuştur. Optimum sıcaklık 100°C olarak belirlenmiştir. Farklı kolemanit ve sepiyolit oranları ile kürlenene iki farklı epoksi R1 ve R2 sıcaklık ile şekil geri kazanım oranı ve süresi sırasıyla Şekil 5.25 ve Şekil 5.26 'da gösterilmiştir. Kompozitlerin R1SAP10S0K3, R1SAP10S3K0, R2SAP10S0K3 ve R2SAP10S3K0 geri kazanım süresi optimum koşullarda sırasıyla 105, 85, 110 ve 115 saniyedir. Daha detaylı şekil hafıza özelliklerinin değerleri tüm kompozitler için Çizelge C 13- Çizelge C 16' da eklenmiştir ve EK C 'de gösterilmiştir. Ayrıca şekil sabitleri Şekil C 13- Şekil C 16' da gösterilmiştir.



Şekil 5.25. Farklı dolgu madde oranları ile kürlenene iki farklı saf epoksi sisteminin (a) R1 ve (b) R2 sıcaklık ile şekil geri kazanım oranı ilişkisi



Şekil 5.26. Farklı dolgu madde oranları ile kürlenene iki farklı saf epoksi sisteminin (a) R1 ve (b) R2 sıcaklık ile şekil geri kazanım süresi ilişkisi

5.9 Şekil Hafıza Döngüsü

Kompozitlerin şekil hafıza döngüsel kararlılığını incelemek amacıyla, MNA ve sikloalifatik poliamin ile sertleştirilen kompozitler için 110 °C, sitrik asit ile sertleştirilen kompozitler için ise 100 °C'de testler yapılmıştır. 30 dakika ara ile on ardışık şekil hafıza döngüsü uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, T_g üzerindeki sıcaklıklarda mükemmel şekil hafıza davranışının elde edildiğini göstermiştir. Ancak, bazı numunelerde belirli mekanik arızaların veya kırılmaların meydana geldiğini göstermiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge D 1- Çizelge D 6'da özetlenmiştir. İlk ve son döngüde şekil sabiti ve geri kazanım şekli Şekil D 1- Şekil D 6'da gösterilmiştir.

Sikloalifatik poliamin ile sertleştirilen R2 kompozitlerinde şekil hafıza döngüsü sırasında kırılma gözlenmiştir. Bu kompozitlerin mekanik özellikleri incelendiğinde, daha düşük çekme dayanımı göstermiştir ve bu durumun dolgu maddelerin aglomerasyon eğilimi göstermesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

MNA ve sikloalifatik poliamin ile sertleştirilen R1-kolemanit takviyeli kompozitlerde, şekil hafıza döngüsü sırasında kırılma gözlenmiştir. Bu durumun, kolemanit parçacıklarının matris içerisinde homojen dağılmaması ve aglomerasyon eğilimi göstermesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Kolemanit parçacıklarının yetersiz dağılması, epoksi matris ile dolgu arasında zayıf ara yüzey bağlanmasına yol açarak gerilme birikimini artırabilir. Literatürde de benzer şekilde, inorganik dolgu maddelerinin aglomerasyonunun kompozitlerin mekanik dayanımını ve çevrimsel kararlılığını olumsuz etkilediği bildirilmektedir (Nagaraju ve ark., 2022). Dolayısıyla, gözlenen kırılma davranışı, kolemanit dolgusunun dağılım kalitesi ile doğrudan ilişkilendirilebilir.

Dikkat çekici bir şekilde, her iki epoksi reçine (R1 ve R2) de sitrik asit ile sertleştirildiğinde ve sepiyolit veya kolemanit takviyesi içerdiğinde, test edilen şekil hafıza döngüsü boyunca herhangi bir kırılma gözlenmemiştir. Bu olağanüstü dayanıklılık, sitrik asit ile sertleşmenin bazı avantajlı özellikler kazandırdığını göstermektedir. Bu özellikler arasında, iç gerilmeleri yeniden dağıtarak hasar birikimini azaltabilen, daha esnek veya dinamik olarak değişim gösterebilen bir ağ yapısının oluşumu yer sağlayabilir.

6 SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1 Sonuçlar

Bu çalışmada, epoksi reçinelerine sepiyolit ve kolemanit dolgu malzemelerinin eklenmesi ve bunların mekanik, termal ve şekil hafıza özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Kompozitlerin başarılı sentezi FT-IR, SEM ve EDX analizleri ile doğrulanmıştır. Çekme testleri, dolgu maddeleri ilavesi ile epoksi matrisinin çekme mukavemetinin arttığını göstermiştir. Aynı koşullar altında R2 epoksi reçine daha yüksek çekme mukavemeti göstermiştir. T_g , PEG molekülleri ve dolgu maddelerinin eklenmesiyle azalmış, bu durum da şekil hafıza performansını geliştirmiştir. MNA ile sertleştirilen R1 epoksi reçine kompozitlerin T_g değerleri R1MP10S5K0 için 44,5 °C ve R1MP10S0K5 için 49,5 °C iken; sikloalifatik poliamin ile sertleştirilenlerde R1AP10S5K0 ve R1AP10S0K5 sırasıyla 47,8 °C ve 48,3 °C olarak bulunmuştur. R2 durumunda ise T_g değerleri R2MP10S5K0 ve R2MP10S0K5 için sırasıyla 47,2 °C ve 52,7 °C, R2AP10S5K0 ve R2AP10S0K5 için ise sırasıyla 50,4 °C ve 51,5 °C olarak bulunmuştur.

Şekil hafıza performansları, şekil sabitleme oranı, geri kazanım oranı ve geri kazanım süresi parametreleri üzerinden değerlendirilmiş ve tüm kompozitlerde mükemmel sonuçlar elde edilmiştir. R1 epoksi reçine kompozitleri optimum sıcaklıkta en kısa geri kazanım süresi göstermiştir. Kompozitlerin geri kazanım süreleri (t_r), R1MP10S5K0, R1MP10S0K5, R1AP10S5K0, R1AP10S0K5, R1SAP10S5K0 ve R1SAP10S0K5 için sırasıyla 105 s, 138 s, 148 s, 180 s, 85 s ve 105 s olarak bulunmuştur.

R1 içeren malzemelerde su sorpsiyon değerlerinin R2'ye kıyasla daha yüksek olduğu bulunmuştur. Sertleştiricilerinin % su sorpsiyonuna etkisinin sitrik asit (SA) ile kürlenene kompozitler en yüksek su alma eğilimini gösterirken, bunu sikloalifatik poliaminle kürlenene kompozitler izlemekte, MNA ile kürlenene kompozitler ise en düşük su sorpsiyonuna sahip kompozitler olarak belirlenmiştir.

Sonuç olarak mekanik dayanım, termal tepki ve şekil hafıza özelliklerindeki iyileşme gösteren değerler nedeniyle sepiyolit ve kolemanit katkılı epoksi kompozitlerin

özellikle havacılık ve otomotiv sektörlerinde kullanımı konusunda umut vadeden malzemeler olduğunu ortaya koymaktadır.

6.2 Öneriler

Bu çalışmada sepiyolit ve kolemanit dolgularının epoksi reçinelerin şekil hafıza özellikleri üzerine etkileri incelenmiş ve önemli sonuçlar elde edilmiştir. Ancak, çalışmanın daha da geliştirilmesi ve farklı uygulama alanlarına katkı sağlaması amacıyla aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

1. Bu çalışmada belirli oranlarda kullanılan dolgu malzemelerinin farklı yüzdeleri denenerek mekanik, termal ve şekil hafıza özellikleri arasındaki optimum denge daha kapsamlı biçimde ortaya konulabilir.
2. MNA, sikloalifatik poliamin ve sitrik asit dışında farklı kürleme ajanlarının kullanılması ile elde edilecek kompozitlerin performansları karşılaştırılarak, farklı kürleme mekanizmalarının şekil hafıza davranışına etkisi ayrıntılı olarak değerlendirilebilir.
3. Sepiyolit ve kolemanit dışında farklı dolgu maddeleri kullanılarak hibrit kompozitler hazırlanıp sinerjik etkiler araştırılabilir.
4. Hazırlanan kompozitlerin nem, UV ışını, sıcaklık değişimleri gibi çevresel faktörlere karşı uzun dönemli dayanıklılık testleri gerçekleştirilerek, özellikle havacılık ve otomotiv alanlarındaki kullanım potansiyeli daha net biçimde ortaya konabilir.
5. Kolemanitin yanmazlık üzerindeki olumlu katkısına ek olarak, farklı alev geciktirici katkılarla birlikte kullanımı denenerek daha yüksek seviyede yanmazlık özellikleri elde edilebilir.
6. PEG katkısının biyouyumluluk özelliği dikkate alınarak, bu kompozitlerin biyomedikal alanlarda (örneğin biyobozunur dikiş iplikleri ve implant malzemeleri) uygulanabilirliği araştırılabilir.

7. Şekil hafıza mekanizmasının daha ayrıntılı biçimde anlaşılabilmesi için moleküler dinamik simülasyonları ve sonlu eleman analizleri gibi modelleme ve simülasyon yöntemlerinden yararlanılabilir.



KAYNAKÇA

- Ahmetli, G., Deveci, H., Soydal, U., Seker, A. ve Kurbanli, R., 2012, Coating, mechanical and thermal properties of epoxy toluene oligomer modified epoxy resin/sepiolite composites, *Progress in Organic Coatings*, 75 (1-2), 97-105.
- Almezgagi, M., Güzel Kaya, G. ve Deveci, H., 2025, Thermo-Responsive Shape Memory Behavior of Epoxy With Different Combinations of Curing Agents and Filler Materials, *Journal of Applied Polymer Science*, 142 (21), e56910.
- Arditti, S. J., Avedikian, S. Z. ve Bernstein, B. S., 1971, Articles with polymeric memory and method of constructing same, Google Patents.
- Bayati, H., Khoramishad, H., Kordzangeneh, D. ve Berto, F., 2021, The effect of hydrophilic and hydrophobic nanofillers on moisture uptake and mechanical properties degradation of nanocomposites under hot and wet conditions, *Физическая мезомеханика*, 24 (1), 79-87.
- Bello, S., Agunsoye, J., Hassan, S., et, al ve Kana, M. Z., 2015, Epoxy resin based composites, mechanical and tribological properties: A review, *Tribology in Industry*, 37 (4), 500.
- Białkowska, A., Bakar, M., Kucharczyk, W. ve Zarzyka, I., 2023, Hybrid epoxy nanocomposites: improvement in mechanical properties and toughening mechanisms—a review, *Polymers*, 15 (6), 1398.
- Burda, I., Barbezat, M. ve Brunner, A. J., 2021, The effect of nano-and micron-scale filler modified epoxy matrix on glass-fiber reinforced polymer insulator component behavior, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 235 (6), 1287-1301.
- Cao, L., Wang, L., Zhou, C., Hu, X., Fang, L., Ni, Y., Lu, C. ve Xu, Z., 2020, Surface Structures, Particles, and Fibers of Shape-Memory Polymers at Micro-/Nanoscale, *Advances in Polymer Technology*, 2020 (1), 7639724.
- Dağ, M., Yanen, C. ve Aydoğmuş, E., 2022, Effect of boron factory components on thermophysical properties of epoxy composite, *European Journal of Science and Technology*, 36, 151-154.
- Dayyoub, T., Maksimkin, A. V., Filippova, O. V., Tcherdyntsev, V. V. ve Telyshev, D. V., 2022, Shape memory polymers as smart materials: a review, *Polymers*, 14 (17), 3511.
- Dev, B., Rahman, M. A., Repon, M. R., Rahman, M. M., Haji, A. ve Nawab, Y., 2023, Recent progress in thermal and acoustic properties of natural fiber reinforced polymer composites: preparation, characterization, and data analysis, *Polymer Composites*, 44 (11), 7235-7297.
- Dole, M., 1981, History of the irradiation cross-linking of polyethylene, *Journal of Macromolecular Science—Chemistry*, 15 (7), 1403-1409.
- Dutta, J. ve Devi, N., 2021, Preparation, optimization, and characterization of chitosan-sepiolite nanocomposite films for wound healing, *International Journal of Biological Macromolecules*, 186, 244-254.
- Dyamenahalli, K., Famili, A. ve Shandas, R., 2015, Characterization of shape-memory polymers for biomedical applications, In: *Shape Memory Polymers for Biomedical Applications*, Eds: Elsevier Ltd, p. 35-63.
- Erdem, A. ve Doğan, M., 2023, Influence of boron bearing fillers on flame retardancy properties of huntite hydromagnesite filled ductile PLA biocomposites, *Journal of Boron*, 8 (1), 16-24.
- Fernandes, I. J., Santos, R. V., Santos, E. C. A. d., Rocha, T. L. A. C., Domingues Junior, N. S. ve Moraes, C. A. M., 2018, Replacement of commercial silica by rice husk

- ash in epoxy composites: a comparative analysis, *Materials Research*, 21, e20160562-e20160562.
- Gabbott, P., 2008, A practical introduction to differential scanning calorimetry, *Principles and applications of thermal analysis*, 1-50.
- Geethamma, V. ve Drupitha, M., 2024, Glass Transition Temperature of Polymers, *Resonance*, 29 (10), 1401-1420.
- Gencil, O., Brostow, W., Ozel, C. ve Filiz, M., 2010, An investigation on the concrete properties containing colemanite, *International Journal of Physical Sciences*, 5 (3), 216-225.
- Ghallemohamadi, M. O., Heydari, I., Jahani, A. ve Behniafar, H., 2023, Simultaneously cured diglycidyl ethers of bisphenol A and polyethylene glycol: DSC, TGA, and DMA measurements, *Polymers for Advanced Technologies*, 34 (9), 2816-2822.
- Guzel, G., Sivrikaya, O. ve Deveci, H., 2016, The use of colemanite and ulexite as novel fillers in epoxy composites: Influences on thermal and physico-mechanical properties, *Composites Part B: Engineering*, 100, 1-9.
- Güzel, G., 2016, Preparation of epoxy resin-slag/groundnut hull composites and investigation of properties, *Master's Thesis, Selçuk University, Institute of Science and Technology, Konya, Turkey*.
- Hamciuc, C., Vlad-Bubulac, T., Serbezeanu, D., Macsim, A.-M., Lisa, G., Anghel, I. ve Şofran, I.-E., 2022, Effects of phosphorus and boron compounds on thermal stability and flame retardancy properties of epoxy composites, *Polymers*, 14 (19), 4005-4005.
- Hardinnawirda, K. ve Aisha, I. S., 2012, Effect of rice husks as filler in polymer matrix composites, *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 2, 181-186.
- Hu, B., Xia, H., Liu, F. ve Ni, Q.-Q., 2021, Development of thermoplastic epoxy filaments with shape memory properties, *Polymer Testing*, 103, 107374.
- Hu, J., Chen, W., Fan, P., Gao, J., Fang, G., Cao, Z. ve Peng, F., 2017, Epoxy shape memory polymer (SMP): Material preparation, uniaxial tensile tests and dynamic mechanical analysis, *Polymer Testing*, 62, 335-341.
- Huang, W. M., Ding, Z., Wang, C. C., Wei, J., Zhao, Y. ve Purnawali, H., 2010, Shape memory materials, *Materials today*, 13 (7-8), 54-61.
- Işık, M. ve Ahmetli, G., 2024, Nanocomposites based on MWCNT and nanoclay: Effect of acrylated epoxidized soybean oil on curing and composite properties, *Industrial Crops and Products*, 221, 119421-119421.
- Jin, F.-L. ve Park, S.-J., 2012, Thermal properties of epoxy resin/filler hybrid composites, *Polymer Degradation and Stability*, 97 (11), 2148-2153.
- Jin, F.-L., Li, X. ve Park, S.-J., 2015, Synthesis and application of epoxy resins: A review, *Journal of industrial and engineering chemistry*, 29, 1-11.
- Kandola, B. K., Magnoni, F. ve Ebdon, J. R., 2022, Flame retardants for epoxy resins: Application-related challenges and solutions, *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 28 (1), 17-49.
- Kara, C., Kutuk, S. ve Kutuk-Sert, T., 2023, Improvement of the durability of concrete by substitution of raw ground colemanite, *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02393.
- Kaya, G. G. ve Deveci, H., 2020a, Modified silica xerogel derived from groundnut hull ash by alkyl-ammonium salt for epoxy nanocomposites: Synergistic effects on thermal stability and flame retardancy, *Thermochimica Acta*, 689, 178637-178637.

- Kaya, G. G. ve Deveci, H., 2020b, Modified silica xerogel derived from groundnut hull ash by alkyl-ammonium salt for epoxy nanocomposites: Synergistic effects on thermal stability and flame retardancy, *Thermochimica Acta*, 689, 178637.
- Kim, M., Jang, S., Choi, S., Yang, J., Kim, J. ve Choi, D., 2021, Analysis of shape memory behavior and mechanical properties of shape memory polymer composites using thermal conductive fillers, *Micromachines*, 12 (9), 1107-1107.
- Kocaman, S. ve Ahmetli, G., 2016, A study of coating properties of biobased modified epoxy resin with different hardeners, *Progress in Organic Coatings*, 97, 53-64.
- Kocaman, S., Temiz, M., Işık, M., Ahmetli, G., Ceyhan, A. A. ve Karakaya, Ş., 2024, Halogen-free boron-based hybrid system for enhancing flame retardancy, mechanical and thermal properties of epoxy, *Journal of Applied Polymer Science*, 141 (22), e55424-e55424.
- Kumar, R., Alex, Y., Nayak, B. ve Mohanty, S., 2023, Effect of poly (ethylene glycol) on 3D printed PLA/PEG blend: A study of physical, mechanical characterization and printability assessment, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 141, 105813.
- Kumar, S., Krishnan, S., Samal, S. K., Mohanty, S. ve Nayak, S. K., 2018, Toughening of petroleum based (DGEBA) epoxy resins with various renewable resources based flexible chains for high performance applications: a review, *Industrial & engineering chemistry research*, 57 (8), 2711-2726.
- Kutuk, S., 2024, Morphology, crystal structure and thermal properties of nano-sized amorphous colemanite synthesis, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49 (8), 11699-11716.
- Lendlein, A. ve Kelch, S., 2002, Shape-memory polymers, *Angewandte Chemie International Edition*, 41 (12), 2034-2057.
- Leng, J., Lu, H., Liu, Y., Huang, W. M. ve Du, S., 2009, Shape-memory polymers—a class of novel smart materials, *MRS bulletin*, 34 (11), 848-855.
- Leng, J., Lan, X., Liu, Y. ve Du, S., 2011, Shape-memory polymers and their composites: stimulus methods and applications, *Progress in Materials Science*, 56 (7), 1077-1135.
- Li, Z., Yang, Y., Ma, L., Liu, H. ve Zhang, X., 2023, Shape memory epoxy resin and its composite with good shape memory performance and high mechanical strength, *Polymer Bulletin*, 80 (2), 1641-1655.
- Liu, C., Qin, H. ve Mather, P. T., 2007a, Review of progress in shape-memory polymers, *Journal of materials chemistry*, 17 (16), 1543-1558.
- Liu, Q., Stuart, T., Hughes, M., Sharma, H. ve Lyons, G., 2007b, Structural biocomposites from flax—Part II: The use of PEG and PVA as interfacial compatibilising agents, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38 (5), 1403-1413.
- Liu, Y., Han, C., Tan, H. ve Du, X., 2010, Thermal, mechanical and shape memory properties of shape memory epoxy resin, *Materials Science and Engineering: A*, 527 (10-11), 2510-2514.
- Lu, H., Yu, K., Sun, S., Liu, Y. ve Leng, J., 2010, Mechanical and shape-memory behavior of shape-memory polymer composites with hybrid fillers, *Polymer International*, 59 (6), 766-771.
- Madbouly, S. A. ve Lendlein, A., 2010, Shape-memory polymer composites, *Shape-memory polymers*, 41-95.
- Mąka, H., Szychaj, T. ve Zenker, M., 2015, High performance epoxy composites cured with ionic liquids, *Journal of industrial and engineering chemistry*, 31, 192-198.

- Margoy, D., Gouzman, I., Grossman, E., Bolker, A., Eliaz, N. ve Verker, R., 2021, Epoxy-based shape memory composite for space applications, *Acta Astronautica*, 178, 908-919.
- Maurya, A., Sinha, S., Kumar, P. ve Singh, V., 2023, A review: Impact of surface treatment of nanofillers for improvement in thermo mechanical properties of the epoxy based nanocomposites, *Materials Today: Proceedings*, 78, 164-172.
- Meng, Q. ve Hu, J., 2009, A review of shape memory polymer composites and blends, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40 (11), 1661-1672.
- Metzger, M. F., Wilson, T. S., Schumann, D., Matthews, D. L. ve Maitland, D. J., 2002, Mechanical properties of mechanical actuator for treating ischemic stroke, *Biomedical Microdevices*, 4 (2), 89-96.
- Mohamed, A. S. Y., 2017, Smart materials innovative technologies in architecture; towards innovative design paradigm, *Energy Procedia*, 115, 139-154.
- Nagaraju, G., Velmurugan, R., Sarathi, R. ve Tanaka, T., 2022, Understanding the interfacial and agglomeration impact in epoxy nanocomposites on its electrical and mechanical properties, *Electrical Engineering*, 104 (4), 2141-2153.
- Najmi, L. ve Hu, Z., 2023, Effects of carbon nanotubes on thermal behavior of epoxy resin composites, *Journal of Composites Science*, 7 (8), 313-313.
- Nedaipour, F., Bagheri, H. ve Mohammadi, S., 2020, "Polylactic acid-polyethylene glycol-hydroxyapatite composite" an efficient composition for interference screws, *Nanocomposites*, 6 (3), 99-110.
- Nohales, A., Solar, L., Porcar, I., Vallo, C. I. ve Gomez, C. M., 2006, Morphology, flexural, and thermal properties of sepiolite modified epoxy resins with different curing agents, *European Polymer Journal*, 42 (11), 3093-3101.
- Nohales, A., Muñoz-Espí, R., Félix, P. ve Gómez, C. M., 2011, Sepiolite-reinforced epoxy nanocomposites: Thermal, mechanical, and morphological behavior, *Journal of Applied Polymer Science*, 119 (1), 539-547.
- Ogbonna, V., Popoola, A. ve Popoola, O., 2023, A review on recent advances on the mechanical and conductivity properties of epoxy nanocomposites for industrial applications, *Polymer Bulletin*, 80 (4), 3449-3487.
- Ozsoy, I., Demirkol, A., Mimaroglu, A., Unal, H. ve Demir, Z., 2015, The influence of micro-and nano-filler content on the mechanical properties of epoxy composites, *Strojnicki Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, 61 (10).
- Pal, N., Srivastava, D. ve Rai, J., 2010, Studies on the effect of epoxide equivalent weight of epoxy resins on thermal, mechanical, and chemical characteristics of vinyl ester resins, *Journal of Applied Polymer Science*, 117 (4), 2406-2412.
- Panda, P. K., Yang, J.-M. ve Chang, Y.-H., 2021, Water-induced shape memory behavior of poly (vinyl alcohol) and p-coumaric acid-modified water-soluble chitosan blended membrane, *Carbohydrate polymers*, 257, 117633.
- Panda, P. K., Dash, P., Biswal, A. K., Chang, Y.-H., Misra, P. K. ve Yang, J.-M., 2022, Synthesis and characterization of modified poly (vinyl alcohol) membrane and study of its enhanced water-induced shape-memory behavior, *Journal of Polymers and the Environment*, 30 (8), 3409-3419.
- Perumal, K. P. S., Boopathi, R., Selvarajan, L. ve Venkataramanan, K., 2023, The effects of zircon particles on the mechanical and morphological properties of glass fibre reinforced epoxy composite, *Materials Today Communications*, 37, 107067-107067.
- Pham, H. Q. ve Marks, M. J., 2000, Epoxy resins, *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*.

- Prabhu, R., Mendonca, S., Bellairu, P. K., DSouza, R. C. ve Bhat, T., 2024, Effect of TiO₂ filler on mechanical and tribological properties of Owen bamboo fiber reinforced epoxy composite, *World Journal of Engineering*, 21 (4), 781-792.
- Qader, I. N., Kök, M., Dagdelen, F. ve Aydoğdu, Y., 2019, A review of smart materials: researches and applications, *El-Cezeri*, 6 (3), 755-788.
- Romero-Zúñiga, G. Y., Navarro-Rodríguez, D. ve Treviño-Martínez, M. E., 2022, Enhanced mechanical performance of a DGEBA epoxy resin-based shape memory polymer by introducing graphene oxide via covalent linking, *Journal of Applied Polymer Science*, 139 (2).
- Saçak, M., 2017, *Gazi Kitabevi Yayınları, Ankara*, p. 88.
- Sahoo, S. K., Khandelwal, V. ve Manik, G., 2018, Development of completely bio-based epoxy networks derived from epoxidized linseed and castor oil cured with citric acid, *Polymers for Advanced Technologies*, 29 (7), 2080-2090.
- Sauter, T., Heuchel, M., Kratz, K. ve Lendlein, A., 2013, Quantifying the shape-memory effect of polymers by cyclic thermomechanical tests, *Polymer Reviews*, 53 (1), 6-40.
- Sembokuya, H., NEGISHI, Y., KUBOUCHI, M. ve TSUDA, K., 2003, Corrosion behavior of epoxy resin cured with different amount of hardener in corrosive solutions, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, 52 (9Appendix), 230-234.
- Şengör, İ., 2013, Shape memory polymer composites containing carbon based fillers, Middle East Technical University.
- Serrano, M. C. ve Ameer, G. A., 2012, Recent insights into the biomedical applications of shape-memory polymers, *Macromolecular bioscience*, 12 (9), 1156-1171.
- Shahabaz, S., Mehrotra, P., Kalita, H., Sharma, S., Naik, N., Noronha, D. J. ve Shetty, N., 2023, Effect of Al₂O₃ and SiC nano-fillers on the mechanical properties of carbon fiber-reinforced epoxy hybrid composites, *Journal of Composites Science*, 7 (4), 133.
- Shejkar, S. K., Agrawal, B., Agrawal, A., Gupta, G. ve Pati, P. R., 2023, Influence of filler content and surface modification on physical and mechanical properties of epoxy/walnut shell particulate composites, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 37 (7), 1215-1232.
- Sheng, Q., Chen, Q., Gu, W., Wang, R., Gu, X., Liu, J., Sun, T., Chen, Y., Sun, J. ve Zhang, S., 2024, The study of curing behavior and thermo-mechanical properties of epoxy adhesives with different anhydrides, *Polymer*, 307, 127342.
- Shundo, A., Yamamoto, S. ve Tanaka, K., 2022, Network formation and physical properties of epoxy resins for future practical applications, *Jacs Au*, 2 (7), 1522-1542.
- Song, W. B., Wang, L. Y. ve Wang, Z. D., 2011, Synthesis and thermomechanical research of shape memory epoxy systems, *Materials Science and Engineering: A*, 529, 29-34.
- Soykan, U. ve Valiyeva, F., 2020, The effect of colemanite addition on the microstructural and mechanical characteristics of ipp, *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A-Applied Sciences and Engineering*, 21, 28-39.
- Sringam, J., Kajornprai, T., Trongsatitkul, T. ve Suppakarn, N., 2025, Shape Memory Performance and Microstructural Evolution in PLA/PEG Blends: Role of Plasticizer Content and Molecular Weight, *Polymers*, 17 (2), 225.
- Sun, S., Weng, Y., Han, Y. ve Zhang, C., 2024, Plasticization mechanism of biobased plasticizers comprising polyethylene glycol diglycidyl ether-butyl citrate with

- both long and short chains on poly (lactic acid), *International Journal of Biological Macromolecules*, 276, 133948-133948.
- Sun, Y., Zhang, Z., Moon, K. S. ve Wong, C. P., 2004, Glass transition and relaxation behavior of epoxy nanocomposites, *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 42 (21), 3849-3858.
- Tian, G., Han, G. ve Wang, F., 2019, STRUCTURE, PROPERTIES AND, *Nanomaterials from Clay Minerals: A New Approach to Green Functional Materials*, 135.
- Tudorachi, N. ve Mustata, F., 2020, Curing and thermal degradation of diglycidyl ether of bisphenol A epoxy resin crosslinked with natural hydroxy acids as environmentally friendly hardeners, *Arabian Journal of Chemistry*, 13 (1), 671-682.
- Tümen, K. U., Kıvrak, B., Alkurt, F. Ö., Akyol, M., Karaaslan, M. ve Ekicibil, A., 2021, Synthesis and characterization of nanoparticles reinforced epoxy based advanced radar absorbing composites, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32 (23), 28007-28018.
- Turaka, S. ve Bandaru, A. K., 2023, Enhancement in mechanical properties of glass/epoxy composites by a hybrid combination of multi-walled carbon nanotubes and graphene nanoparticles, *Polymers*, 15 (5), 1189.
- Ucpinar Durmaz, B. ve Aytac, A., 2021, Effects of polyol-based plasticizer types and concentration on the properties of polyvinyl alcohol and casein blend films, *Journal of Polymers and the Environment*, 29 (1), 313-322.
- Vernon, L. B. ve Vernon, H. M., 1941, Producing molded articles such as dentures from thermoplastic synthetic resins, *US Pat*, 2234993.
- Wagermaier, W., Kratz, K., Heuchel, M. ve Lendlein, A., 2010, Characterization methods for shape-memory polymers, *Shape-memory polymers*, 97-145.
- Wang, Y., Tang, L., Li, Y., Li, Q. ve Bai, B., 2021, Preparation of modified multi-walled carbon nanotubes as a reinforcement for epoxy shape-memory polymer composites, *Polymers for Advanced Technologies*, 32 (1), 67-75.
- Wei, H., Wang, D. ve Xing, W., 2023, Strengthening and toughening Technology of epoxy resin, *Journal of Physics: Conference Series*, 012066.
- Wei, K., Zhu, G., Tang, Y., Tian, G. ve Xie, J., 2012, Thermomechanical properties of shape-memory hydro-epoxy resin, *Smart materials and structures*, 21 (5), 055022-055022.
- Wei, K., Zhu, G., Tang, Y., Liu, T. ve Xie, J., 2013, The effects of crosslink density on thermo-mechanical properties of shape-memory hydro-epoxy resin, *Journal of Materials Research*, 28 (20), 2903-2910.
- Wu, X., Yang, X., Zhang, Y. ve Huang, W., 2016, A new shape memory epoxy resin with excellent comprehensive properties, *Journal of Materials Science*, 51 (6), 3231-3240.
- Xia, Y., He, Y., Zhang, F., Liu, Y. ve Leng, J., 2021, A review of shape memory polymers and composites: mechanisms, materials, and applications, *Advanced materials*, 33 (6), 2000713-2000713.
- Yakacki, C. M. ve Gall, K., 2009, Shape-memory polymers for biomedical applications, *Shape-memory polymers*, 147-175.
- Yanardag, D., Ahmetli, G., Karaman, M. ve Kocaman, S., 2022, PECVD application to obtain polymer coated graphene nanoplatelets and development of new epoxy nanocomposites, *Express Polymer Letters*, 16 (1), 2-20.

- Yu, K., Xie, T., Leng, J., Ding, Y. ve Qi, H. J., 2012, Mechanisms of multi-shape memory effects and associated energy release in shape memory polymers, *Soft Matter*, 8 (20), 5687-5695.
- Zakut, M. ve Kızılcın, N., 2022, Investigation of flame retardancy properties of polypropylene-colemanite and intumescent flame retardant additive blends.
- Zhan, M.-Q., Yang, K.-K. ve Wang, Y.-Z., 2015, Shape-memory poly (p-dioxanone)–poly (ϵ -caprolactone)/sepiolite nanocomposites with enhanced recovery stress, *Chinese Chemical Letters*, 26 (10), 1221-1224.
- Zhang, C.-H., Wei, H.-G., Liu, Y.-Y., Tan, H.-F. ve Guo, Z., 2012, Enhanced toughness and shape memory behaviors of toughed epoxy resin, *High Performance Polymers*, 24 (8), 702-709.
- Zheng, N., Fang, G., Cao, Z., Zhao, Q. ve Xie, T., 2015, High strain epoxy shape memory polymer, *Polymer Chemistry*, 6 (16), 3046-3053.
- Zhi, M., Yang, X., Fan, R., Yue, S., Zheng, L., Liu, Q. ve He, Y., 2022, A comprehensive review of reactive flame-retardant epoxy resin: fundamentals, recent developments, and perspectives, *Polymer Degradation and Stability*, 201, 109976.
- Zhou, W., Xia, Y., Tsai, F.-C., Jiang, T., Zhao, H. ve Wen, J., 2017, Effects of compound curing agent on the thermo-mechanical properties and structure of epoxy asphalt, *International Journal of Pavement Engineering*, 18 (10), 928-936.

Ekler A: Mekanik özellikler

Çizelge A 1. PEG içeren farklı miktarlarda MNA ile kürlenmiş R1 epoksinin mekanik özellikleri

PEG (w/w %)	Kopma uzaması (%)	Çekme mukavemeti (MPa)	E- mod
R1MP0S0K0	12,73	77,57	154,62
R1MP5S0K0	11,54	64,95	137,83
R1MP10S0K0	10,64	57,86	113,63
R1MP15S0K0	9,32	48,96	84,83

Çizelge A 2. PEG içeren farklı miktarlarda sikloalifatik poliamin ile kürlenmiş R1 epoksinin mekanik özellikleri

PEG (w/w%)	Kopma uzaması (%)	Çekme mukavemeti (MPa)	E- mod
R1AP0S0K0	11,95	76,10	148,15
R1AP5S0K0	10,29	62,30	121,16
R1AP10S0K0	10,04	54,90	99,02
R1AP15S0K0	8,96	47,76	75,42

Çizelge A 3. Farklı dolgu içeriğinin bir fonksiyonu olarak MNA ile kürlenmiş R1MP10S0K0 kompozitlerinin mekanik özellikleri

Kolemanit (w/w%)	Kopma uzaması (%)	Çekme mukavemeti (MPa)	E- mod
R1MP10S0K0	26,14	50,00	70,93
R1MP10S0K1	35,06	78,20	139,81
R1MP10S0K3	30,00	86,20	118,73
R1MP10S0K5	39,74	101,70	153,34
R1MP10S0K10	30,17	98,97	173,99

Sepiyolit (w/w%)	Kopma uzaması (%)	Çekme mukavemeti (MPa)	E- mod
R1MP10S0K0	25,32	53,93	122,22
R1MP10S1K0	34,12	87,32	145,42
R1MP10S3K0	48,16	94,11	154,35
R1MP10S5K0	51,70	116,90	160,00
R1MP10S10K0	35,37	107,60	120,18

Çizelge A 4. Farklı dolgu içeriğinin bir fonksiyonu olarak sikloalifatik poliamin ile kürlen R1AP10S0K0 kompozitlerinin mekanik özellikleri

Kolemanit (w/w%)	Kopma uzaması (%)	Çekme mukavemeti (MPa)	E- mod
R1AP10S0K0	29,56	59,20	106,86
R1AP10S0K1	37,69	81,40	101,70
R1AP10S0K3	46,88	84,50	96,67
R1AP10S0K5	56,66	95,40	95,77
R1AP10S0K10	57,77	84,10	83,99

Sepiyolit (w/w%)	Kopma uzaması (%)	Çekme mukavemeti (MPa)	E- mod
R1AP10S0K0	76,92	57,90	59,17
R1AP10S1K0	77,42	76,90	98,89
R1AP10S3K0	78,85	87,50	87,26
R1AP10S5K0	77,42	106,30	88,06
R1AP10S10K0	77,72	97,40	54,44

Çizelge A 5. Farklı dolgu içeriğinin bir fonksiyonu olarak MNA ile kürlen R2MP10S0K0 kompozitlerinin mekanik özellikleri

Kolemanit (w/w%)	Kopma uzaması (%)	Çekme mukavemeti (MPa)	E- mod
R2MP10S0K0	29,767	70,80	135,42
R2MP10S0K1	31,22	76,00	134,78
R2MP10S0K3	32,143	84,80	144,44
R2MP10S0K5	66,242	113,20	133,33
R2MP10S0K10	59,211	109,10	148,52

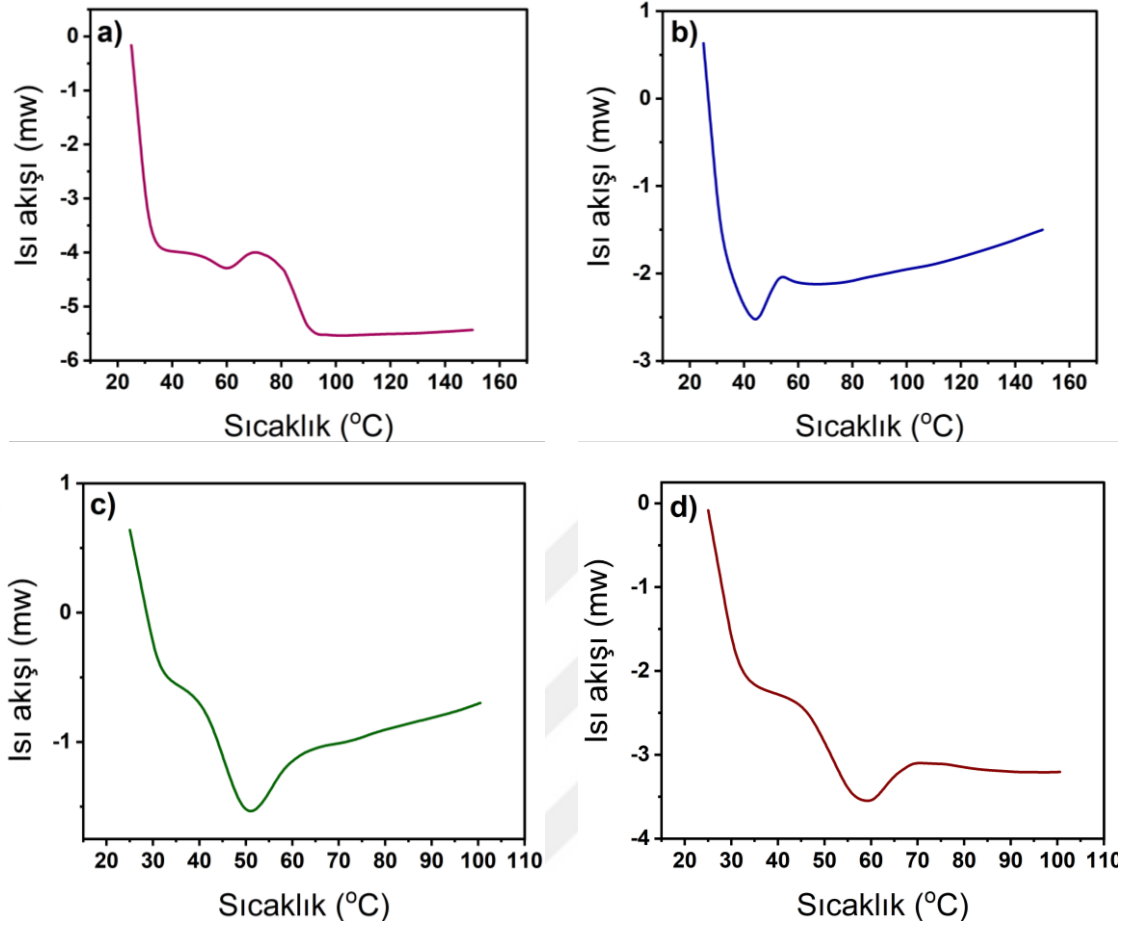
Sepiyolit (w/w%)	Kopma uzaması (%)	Çekme mukavemeti (MPa)	E- mod
R2MP10S0K0	37,02	74,20	93,81
R2MP10S1K0	39,33	87,20	95,80
R2MP10S3K0	43,67	92,46	173,96
R2MP10S5K0	57,95	122,50	156,80
R2MP10S10K0	68,69	111,40	145,51

Çizelge A 6. Farklı dolgu içeriğinin bir fonksiyonu olarak sikloalifatik poliamin ile kürlen R2AP10S0K0 kompozitlerinin mekanik özellikleri

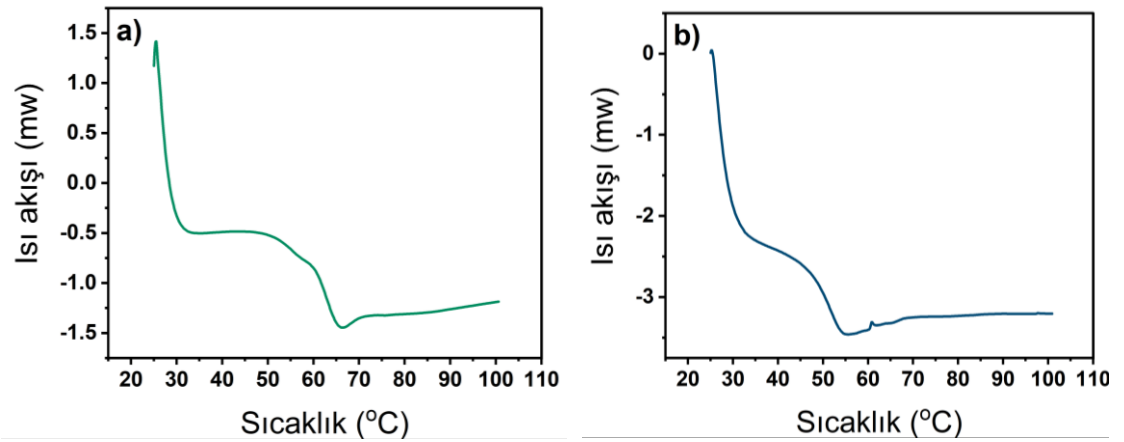
Kolemanit (w/w%)	Kopma uzaması (%)	Çekme mukavemeti (MPa)	E- mod
R2AP10S0K0	17,61	65,00	106,22
R2AP10S0K1	23,94	78,20	106,67
R2AP10S0K3	23,35	84,70	86,39
R2AP10S0K5	43,32	98,30	100,28
R2AP10S0K10	30,00	97,70	99,72

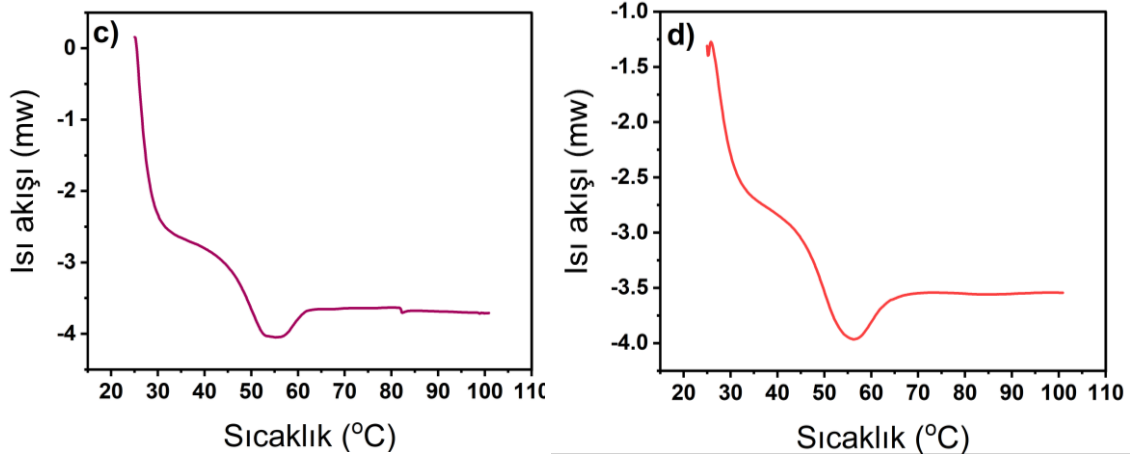
Sepiyolit (w/w%)	Kopma uzaması (%)	Çekme mukavemeti (MPa)	E- mod
R2AP10S0K0	29,54	69,10	137,30
R2AP10S1K0	24,15	81,30	146,35
R2AP10S3K0	33,21	91,30	117,89
R2AP10S5K0	37,61	111,70	114,17
R2AP10S10K0	45,52	102,57	92,39

Ekler B: Termal özellikler

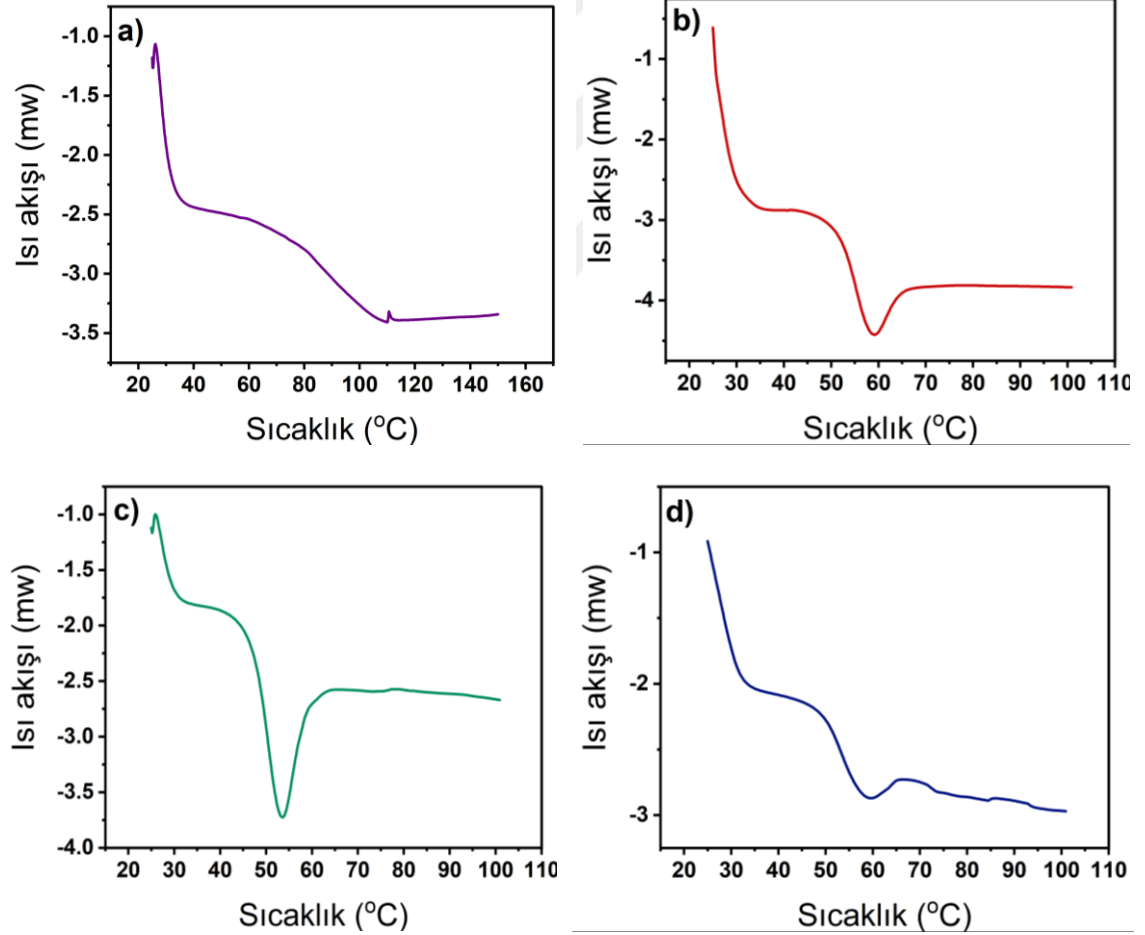


Şekil B 1. MNA ile kürlenmiş R1'in DSC analizi a) saf epoksi (R1), b) R1MP10S0K0, c) R1MP10S5K0 ve d) R1MP10S0K5

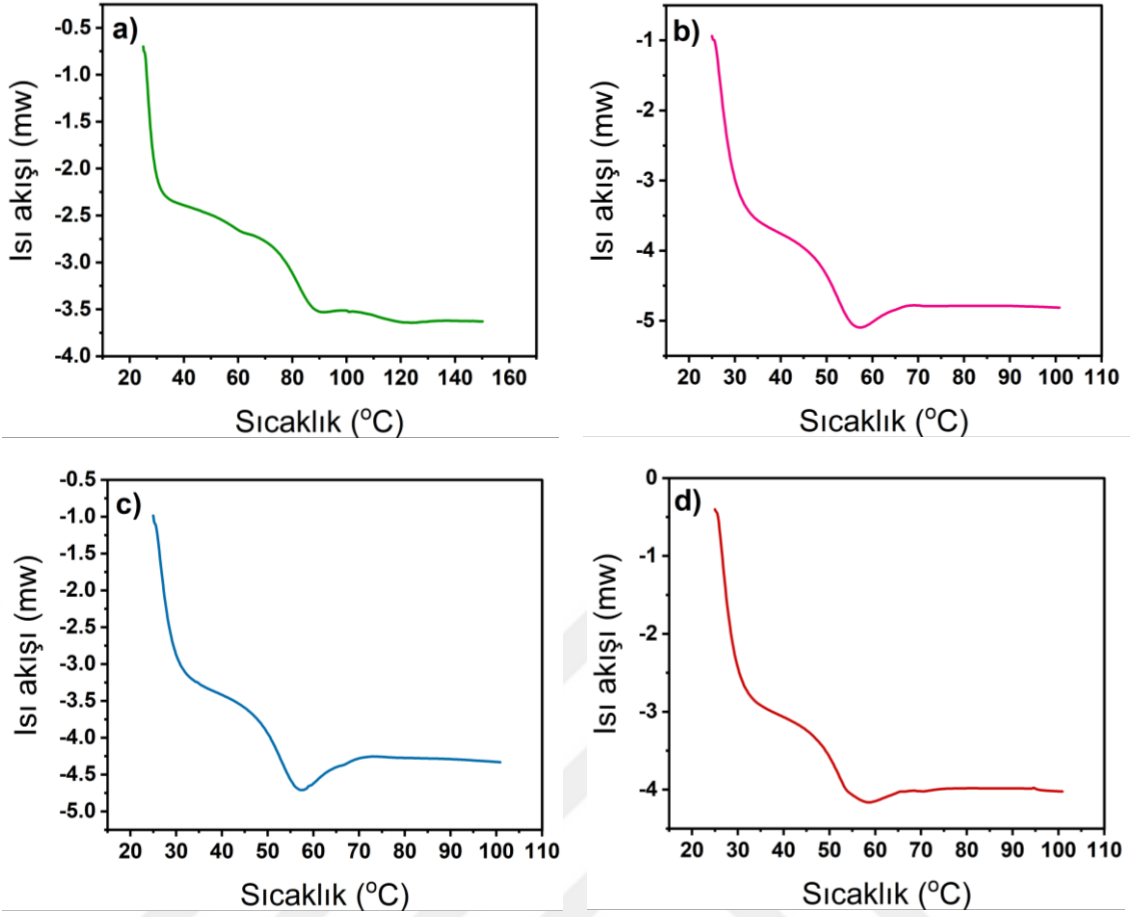




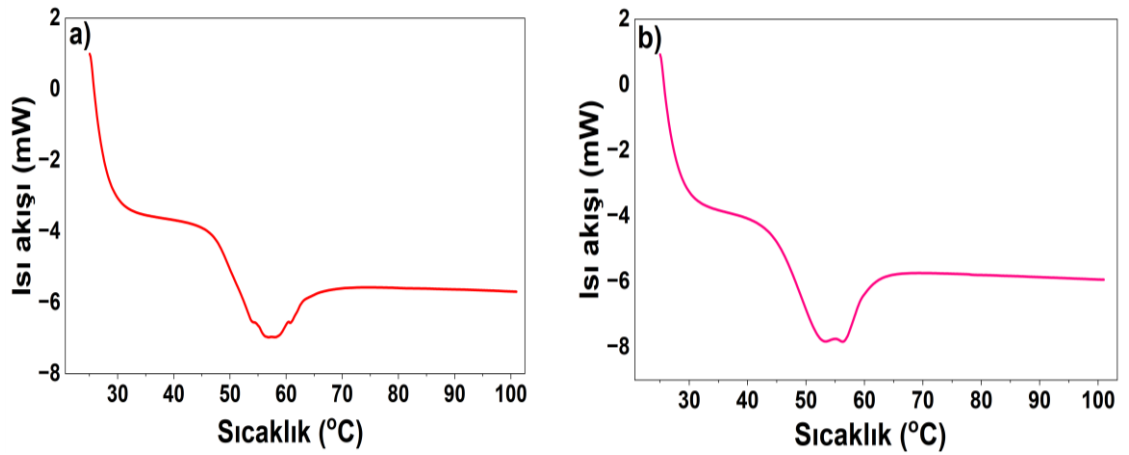
Şekil B 2. Sikloalifatik poliamin ile kürlenmiş R1'in DSC analizi a) saf epoksi (R1), b) R1AP10S0K0, c) R1AP10S5K0 ve d) R1AP10S0K5

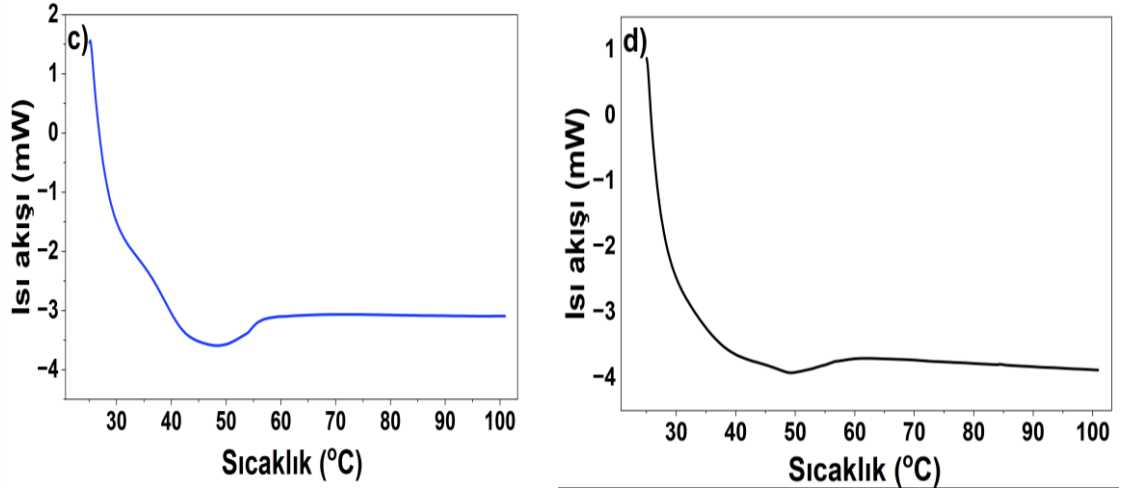


Şekil B 3. MNA ile kürlenmiş R2'nin DSC analizi a) saf epoksi (R2), b) R2MP10S0K0, c) R2MP10S5K0 ve d) R2MP10S0K5

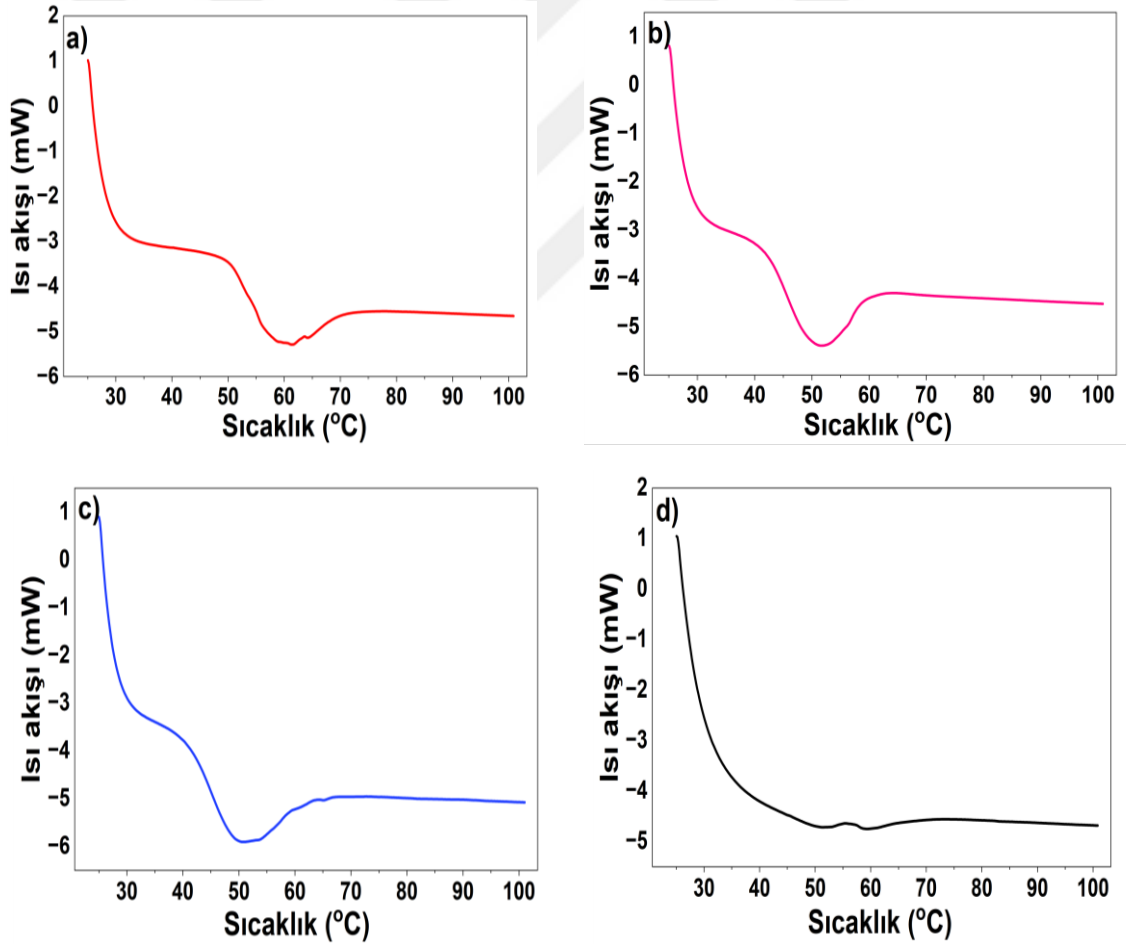


Şekil B 4. Sikloalifatik poliamin ile kürlenmiş R2'nin DSC analizi a) saf epoksi (R2), b) R2AP10S0K0, c) R2AP10S5K0 ve d) R2AP10S0K5





Şekil B 5. SA ile kürlenmiş R1'nin DSC analizi a) saf epoksi (R1), b) R1SAP5S0K0, c) R1SAP5S3K0 ve d) R1SAP5S0K3

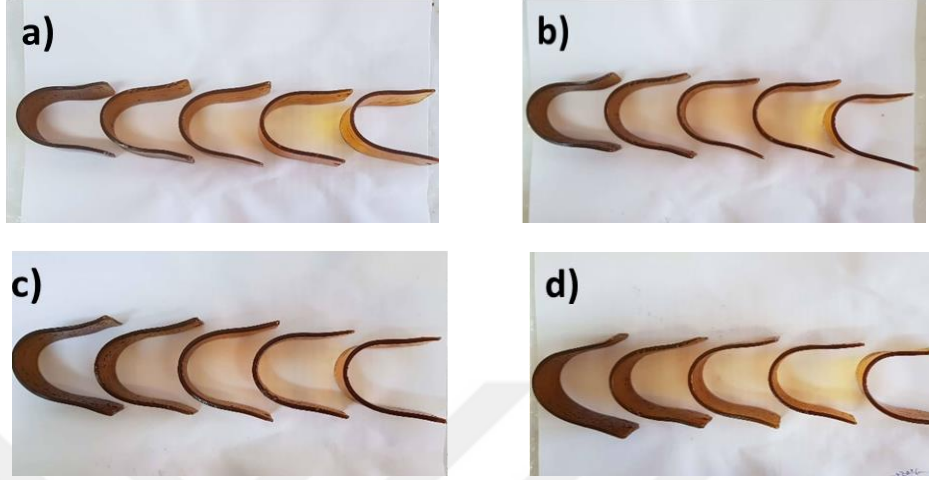


Şekil B 6. SA ile kürlenmiş R2'nin DSC analizi a) saf epoksi (R2), b) R2SAP10S0K0, c) R2SAP10S3K0 ve d) R2SAP10S0K3

Ekler C: Şekil hafıza özellikleri

MNA ve sikloalifatik poliamin

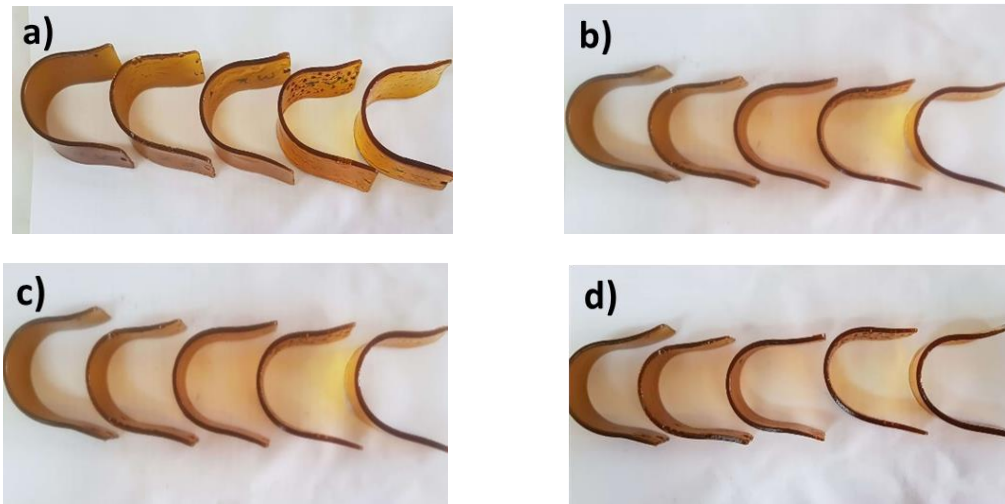
NPEF 170



Şekil C 1. a) 90 °C, b) 100 °C, c) 110 °C ve d) 120 °C'de MNA ile kürlenmiş R1MP10SyK0 kompozitlerinin sabit şekli (Her görüntüde sepiyolit miktarı soldan sağa doğru azalmaktadır.)

Çizelge C 1. Farklı sepiyolit oranları kullanıldığında farklı sıcaklıklarda MNA ile kürlenmiş R1 kompozitlerinin şekil hafıza özellikleri

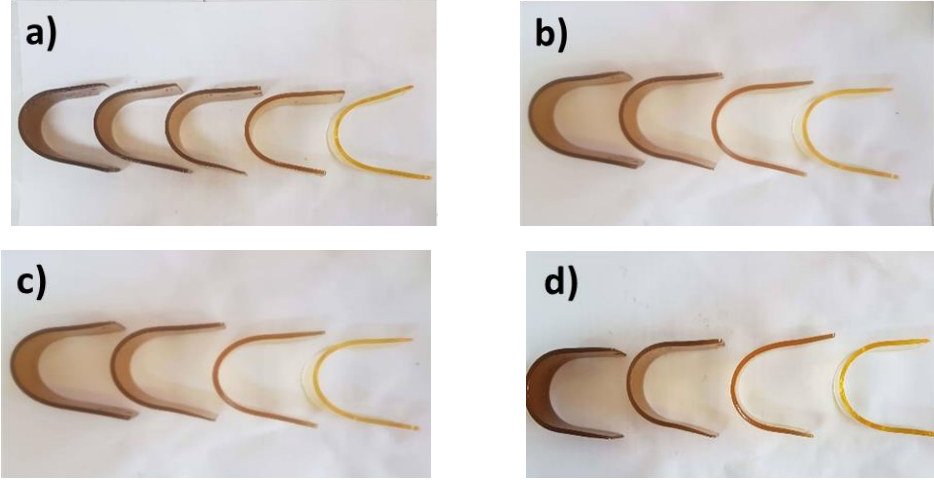
Sıcaklık (°C)	Sepiyolit (w/w%)	R _f (%)	R _r (%)	t _r (dakika)	t _r (saniye)
90	R1MP10S0K0	96,154	99,387	3,42	205
	R1MP10S1K0	98,000	99,394	4,25	255
	R1MP10S3K0	94,340	99,401	3,17	190
	R1MP10S5K0	96,154	99,405	2,42	145
	R1MP10S10K0	98,148	99,298	1,82	109
100	R1MP10S0K0	96,154	99,379	2,67	160
	R1MP10S1K0	96,226	99,390	3,22	193
	R1MP10S3K0	92,593	99,394	2,53	152
	R1MP10S5K0	90,909	99,383	2,12	127
	R1MP10S10K0	94,340	99,375	1,58	95
110	R1MP10S0K0	96,154	99,394	2,42	145
	R1MP10S1K0	96,226	99,398	2,75	165
	R1MP10S3K0	91,071	99,387	2,25	135
	R1MP10S5K0	92,982	99,379	1,75	105
	R1MP10S10K0	94,737	99,375	1,30	78
120	R1MP10S0K0	92,453	99,412	1,87	112
	R1MP10S1K0	96,154	99,401	2,33	140
	R1MP10S3K0	94,231	99,394	1,85	111
	R1MP10S5K0	84,483	99,379	1,50	90
	R1MP10S10K0	84,127	99,359	1,17	70



Şekil C 2. a) 90 °C, b) 100 °C, c) 110 °C ve d) 120 °C'de MNA ile kürlenene R1MP10S0Kz kompozitlerinin sabit şekli (Her görüntüde kolemanit miktarı soldan sağa doğru azalmaktadır.)

Çizelge C 2. Farklı kolemanit oranları kullanıldığında farklı sıcaklıklarda MNA ile kürlenene R1 kompozitlerinin şekil hafıza özellikleri

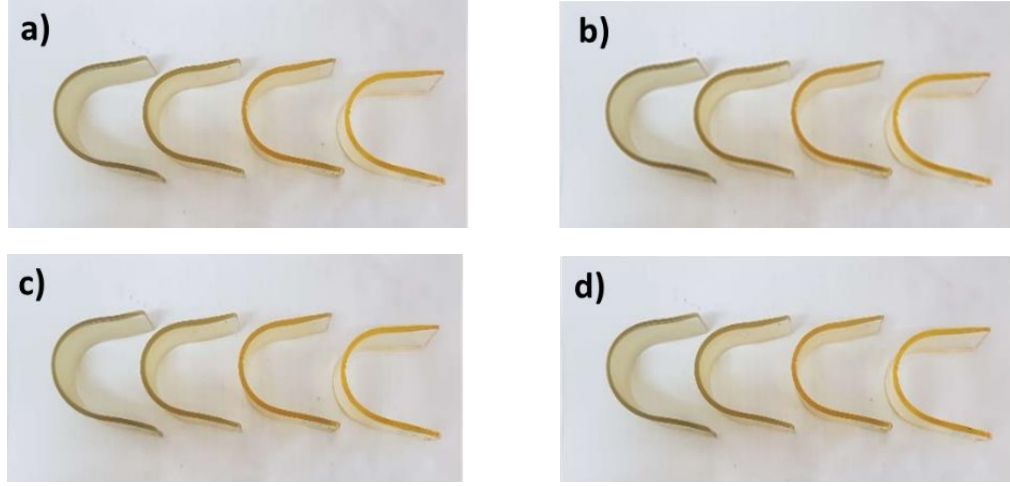
Sıcaklık (°C)	Kolemanit (w/w%)	R _r (%)	R _r (%)	t _r (dakika)	t _r (saniye)
90	R1MP10S0K0	96,226	99,375	5,40	324
	R1MP10S0K1	94,545	99,355	3,83	230
	R1MP10S0K3	94,340	99,359	3,80	228
	R1MP10S0K5	96,000	99,383	3,50	210
	R1MP10S0K10	94,340	99,405	3,45	207
100	R1MP10S0K0	94,545	99,394	4,30	258
	R1MP10S0K1	96,364	99,383	3,50	210
	R1MP10S0K3	94,545	99,394	3,05	183
	R1MP10S0K5	96,364	99,390	2,59	155,40
	R1MP10S0K10	96,364	99,398	2,40	144
110	R1MP10S0K0	94,737	99,394	3,80	228
	R1MP10S0K1	94,643	99,390	2,40	144
	R1MP10S0K3	91,379	99,367	2,37	142,20
	R1MP10S0K5	94,643	99,387	2,30	138
	R1MP10S0K10	91,228	99,383	2,23	133,8
120	R1MP10S0K0	94,340	99,401	3,65	219
	R1MP10S0K1	94,231	99,408	2,18	130,8
	R1MP10S0K3	98,039	99,405	2,00	120
	R1MP10S0K5	96,226	99,412	1,90	114
	R1MP10S0K10	94,643	99,375	1,60	96



Şekil C 3. a) 90 °C, b) 100 °C, c) 110 °C ve d) 120 °C'de sikloalifatik poliamin ile kürlen R1AP10SyK0 kompozitlerinin sabit şekli (Her görüntüde sepiyolit miktarı soldan sağa doğru azalmaktadır.)

Çizelge C 3. Farklı sepiyolit oranları kullanıldığında farklı sıcaklıklarda sikloalifatik poliamin ile kürlen R1 kompozitlerinin şekil hafızası özellikleri

Sıcaklık (°C)	Sepiyolit (w/w%)	R _f (%)	R _r (%)	t _r (dakika)	t _r (saniye)
90	R1AP10S0K0	94,340	98,710	5,42	325
	R1AP10S1K0	96,078	98,795	4,83	290
	R1AP10S3K0	96,000	98,734	4,25	255
	R1AP10S5K0	96,154	98,125	4,00	240
	R1AP10S10K0	98,182	98,089	5,12	310
100	R1AP10S0K0	94,340	98,758	4,50	270
	R1AP10S1K0	94,545	98,802	4,42	265
	R1AP10S3K0	94,643	98,182	4,12	250
	R1AP10S5K0	96,364	98,148	3,67	220
	R1AP10S10K0	-	-	-	-
110	R1AP10S0K0	96,226	98,802	3,00	180
	R1AP10S1K0	94,643	98,788	2,92	175
	R1AP10S3K0	92,857	98,101	2,58	155
	R1AP10S5K0	92,593	98,160	2,47	148
	R1AP10S10K0	-	-	-	-
120	R1AP10S0K0	94,340	98,802	3,33	200
	R1AP10S1K0	92,453	98,788	2,80	168
	R1AP10S3K0	92,593	98,810	2,50	150
	R1AP10S5K0	92,308	98,235	2,37	142,20
	R1AP10S10K0	-	-	-	-

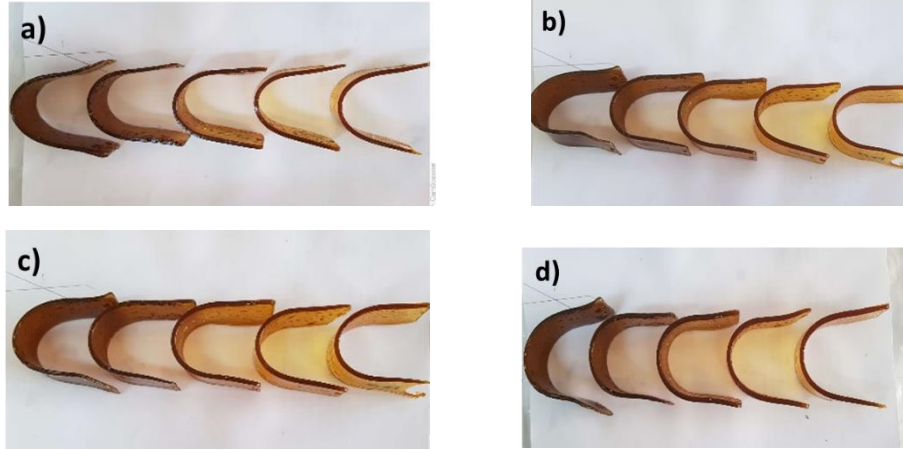


Şekil C 4. a) 90 °C, b) 100 °C, c) 110 °C ve d) 120 °C'de sikloalifatik poliamin ile kürlen R1AP10S0Kz kompozitlerinin sabit şekli (Her görüntüde dolgu içeriğinin soldan sağa doğru azalmaktadır.)

Çizelge C 4. Farklı kolemanit oranları kullanıldığında farklı sıcaklıklarda sikloalifatik poliamin ile kürlen R1 kompozitlerinin şekil hafızası özellikleri

Sıcaklık (°C)	Kolemanit (w/w%)	R _r (%)	R _r (%)	t _r (dakika)	t _r (saniye)
90	R1AP10S0K0	96,078	98,758	6,40	384
	R1AP10S0K1	96,226	97,484	6,67	400,20
	R1AP10S0K3	92,593	97,484	6,50	390
	R1AP10S0K5	89,091	96,875	6,25	375
	R1AP10S0K10	-	-	-	-
100	R1AP10S0K0	94,340	98,758	5,53	331,80
	R1AP10S0K1	92,593	98,182	4,25	255
	R1AP10S0K3	92,727	97,516	4,12	247,20
	R1AP10S0K5	94,340	97,006	4,08	244,8
	R1AP10S0K10	-	-	-	-
110	R1AP10S0K0	96,226	98,802	4,67	280,20
	R1AP10S0K1	94,643	98,160	3,47	208
	R1AP10S0K3	96,296	98,137	3,33	200
	R1AP10S0K5	94,545	98,125	3,00	180
	R1AP10S0K10	-	-	-	-
120	R1AP10S0K0	94,340	98,802	4,00	240
	R1AP10S0K1	92,593	98,182	3,12	190
	R1AP10S0K3	92,727	98,193	2,92	175
	R1AP10S0K5	92,593	97,500	2,67	160
	R1AP10S0K10	-	-	-	-

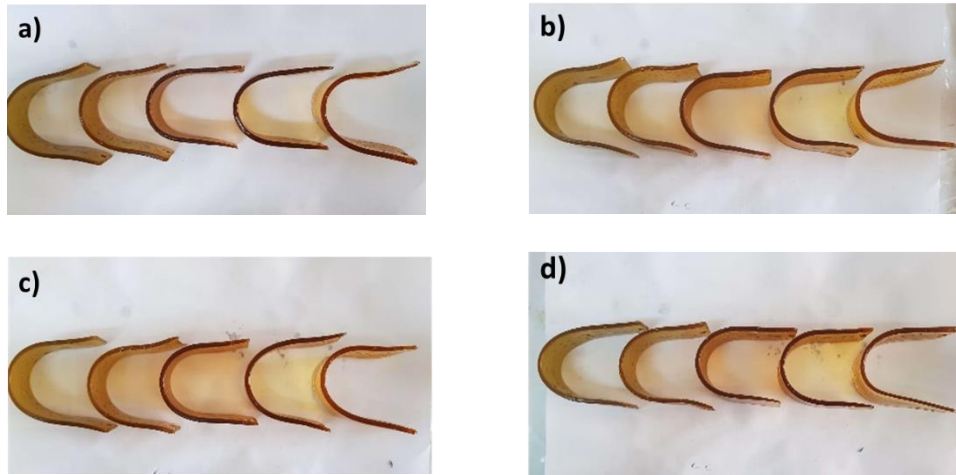
ER 128



Şekil C 5. a) 90 °C, b) 100 °C, c) 110 °C ve d) 120 °C'de MNA ile kürlen R2MP10SyK0 kompozitlerinin sabit şekli (Her görüntüde sepiyolit miktarı soldan sağa doğru azalmaktadır.)

Çizelge C 5. Farklı sepiyolit oranları kullanıldığında farklı sıcaklıklarda MNA ile kürlen R2 kompozitlerinin şekil hafızası özellikleri

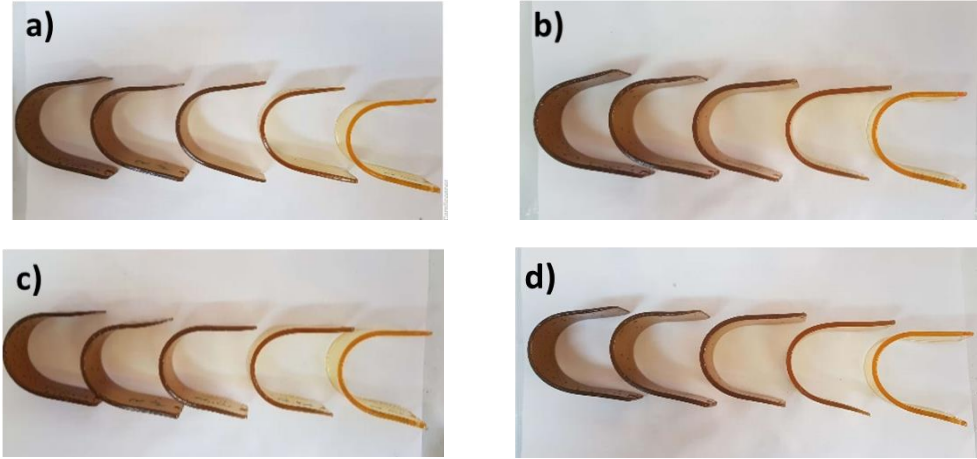
Sıcaklık (°C)	Sepiyolit (w/w%)	R _f (%)	R _r (%)	t _r (dakika)	t _r (saniye)
90	R2MP10S0K0	86,210	98,760	5,67	340,20
	R2MP10S1K0	94,640	94,510	6,67	400,20
	R2MP10S3K0	96,150	98,820	6,50	390
	R2MP10S5K0	94,340	98,210	6,28	376,80
	R2MP10S10K0	88,330	97,800	5,25	315
100	R2MP10S0K0	94,340	99,420	5,00	300
	R2MP10S1K0	98,040	98,790	5,67	340,20
	R2MP10S3K0	96.000	98,820	4,77	286,20
	R2MP10S5K0	98.000	99,410	4,58	274,80
	R2MP10S10K0	96.000	99,030	3,67	220,20
110	R2MP10S0K0	98,040	99,420	3,83	229,80
	R2MP10S1K0	98,040	99,400	5,00	300
	R2MP10S3K0	96,000	99,430	3,67	220,20
	R2MP10S5K0	94,230	99,450	3,33	199,80
	R2MP10S10K0	92,450	99,120	2,65	159
120	R2MP10S0K0	96,150	99,410	3,33	199,80
	R2MP10S1K0	98,040	99,400	3,88	232,80
	R2MP10S3K0	96,000	99,410	3,30	198
	R2MP10S5K0	96,000	99,420	3,08	184,80
	R2MP10S10K0	86,210	99,040	2,17	130,20



Şekil C 6. a) 90 °C, b) 100 °C, c) 110 °C ve d) 120 °C'de MNA ile kürlenen R2MP10S0Kz kompozitlerinin sabit şekli (Her görüntüde kolemanit miktarı soldan sağa doğru azalmaktadır.)

Çizelge C 6. Farklı kolemanit oranları kullanıldığında farklı sıcaklıklarda MNA ile kürlenen R2 kompozitlerinin şekil hafızası özellikleri

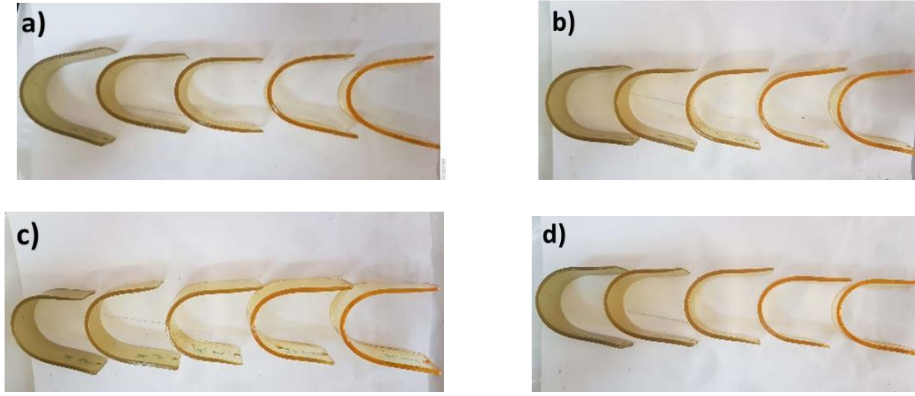
Sıcaklık (°C)	Kolemanit (w/w%)	R _f (%)	R _r (%)	t _r (dakika)	t _r (saniye)
90	R2MP10S0K0	89,290	98,770	6,40	384
	R2MP10S0K1	98,000	98,820	7,50	450
	R2MP10S0K3	98,000	95,830	6,20	372
	R2MP10S0K5	96,150	97,630	6,00	360
	R2MP10S0K10	94,340	97,020	5,87	352,20
100	R2MP10S0K0	96,000	99,210	5,95	357
	R2MP10S0K1	98,000	99,300	6,57	394,20
	R2MP10S0K3	98,040	99,410	6,00	360
	R2MP10S0K5	96,070	99,430	4,45	267
	R2MP10S0K10	94,340	99,360	4,35	261
110	R2MP10S0K0	96,150	99,420	4,70	282
	R2MP10S0K1	87,710	99,390	5,30	318
	R2MP10S0K3	98,000	99,420	5,10	306
	R2MP10S0K5	94,230	99,380	4,07	244,20
	R2MP10S0K10	94,230	99,340	3,50	210
120	R2MP10S0K0	96,000	99,420	4,30	258
	R2MP10S0K1	93,878	99,430	4,20	252
	R2MP10S0K3	97,917	99,470	3,45	207
	R2MP10S0K5	94,000	99,490	3,05	183
	R2MP10S0K10	96,000	99,400	2,50	150



Şekil C 7. a) 90 °C, b) 100 °C, c) 110 °C ve d) 120 °C'de sikloalifatik poliamin ile kürlen R2AP10SyK0 kompozitlerinin sabit şekli (Her görüntüde sepiyolit miktarı soldan sağa doğru azalmaktadır.)

Çizelge C 7. Farklı sepiyolit oranları kullanıldığında farklı sıcaklıklarda sikloalifatik poliamin ile kürlen R2 kompozitlerinin şekil hafızası özellikleri

Sıcaklık (°C)	Sepiyolit (w/w%)	R _r (%)	R _r (%)	t _r (dakika)	t _r (saniye)
90	R2AP10S0K0	94,330	92,540	8,58	514,80
	R2AP10S1K0	88,890	90,900	8,92	535,20
	R2AP10S3K0	87,710	92,500	8,38	502,80
	R2AP10S5K0	87,500	93,860	8,33	499,80
	R2AP10S10K0	81,670	88,750	8,00	480
100	R2AP10S0K0	96,000	98,250	6,67	400,20
	R2AP10S1K0	92,450	95,060	5,92	355,20
	R2AP10S3K0	90,900	96,540	5,83	349,80
	R2AP10S5K0	92,590	97,750	5,67	340,20
	R2AP10S10K0	88,330	90,620	5,42	325,20
110	R2AP10S0K0	90,000	97,050	6,58	394,80
	R2AP10S1K0	92,300	98,120	5,08	304,80
	R2AP10S3K0	94,110	98,210	4,54	272,40
	R2AP10S5K0	90,900	98,770	4,42	265,20
	R2AP10S10K0	90,740	97,020	4,36	261,60
120	R2AP10S0K0	90,560	98,180	5,67	340,20
	R2AP10S1K0	89,090	98,800	4,50	270
	R2AP10S3K0	89,090	99,100	4,40	264
	R2AP10S5K0	92,300	99,790	4,12	247,20
	R2AP10S10K0	89,090	97,570	4,00	240

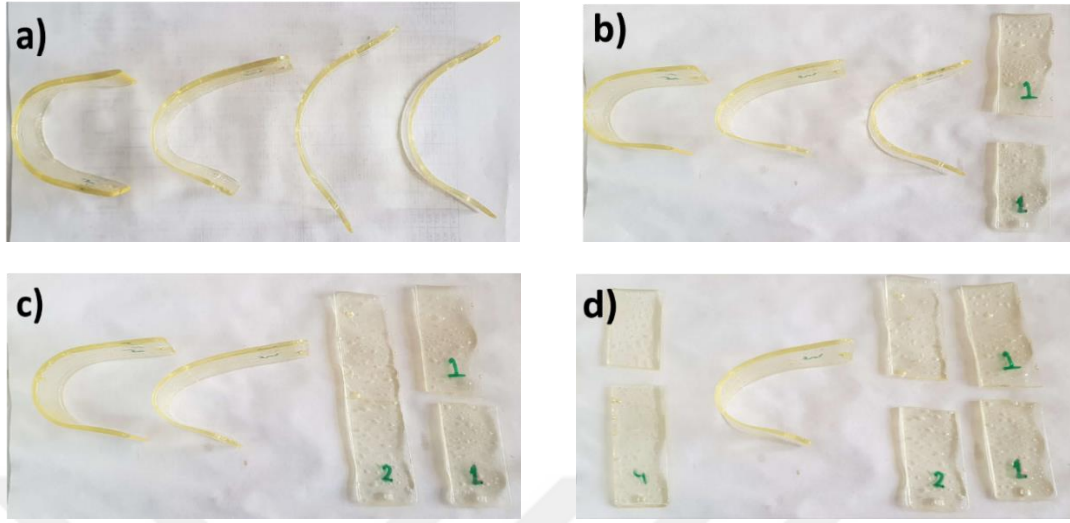


Şekil C 8. a) 90 °C, b) 100 °C, c) 110 °C ve d) 120 °C'de sikloalifatik poliamin ile kürlenen R2AP10S0Kz kompozitlerinin sabit şekli (Her görüntüde kolemanit miktarı soldan sağa doğru azalmaktadır.)

Çizelge C 8. Farklı kolemanit oranları kullanıldığında farklı sıcaklıklarda sikloalifatik poliamin ile kürlenen R2 kompozitlerinin şekil hafızası özellikleri

Sıcaklık (°C)	Kolemanit (w/w%)	R _f (%)	R _r (%)	t _r (dakika)	t _r (saniye)
90	R2AP10S0K0	90,900	84,960	7,20	432
	R2AP10S0K1	87,270	90,360	7,40	444
	R2AP10S0K3	90,000	92,900	6,30	378
	R2AP10S0K5	90,560	94,370	6,10	366
	R2AP10S0K10	81,350	95,030	5,90	354
100	R2AP10S0K0	96,000	90,540	6,83	409,80
	R2AP10S0K1	92,450	95,090	7,20	432
	R2AP10S0K3	90,000	96,340	6,15	369
	R2AP10S0K5	92,450	97,120	6,00	360
	R2AP10S0K10	96,070	95,730	5,50	330
110	R2AP10S0K0	96,000	97,230	5,40	324
	R2AP10S0K1	94,230	98,230	5,63	337,8
	R2AP10S0K3	90,560	99,390	5,50	330
	R2AP10S0K5	90,740	99,400	5,42	325,20
	R2AP10S0K10	94,330	99,390	4,42	265,20
120	R2AP10S0K0	96,000	97,680	4,83	289,80
	R2AP10S0K1	94,110	98,250	4,92	295,20
	R2AP10S0K3	90,560	98,820	4,67	280,20
	R2AP10S0K5	90,380	98,830	4,33	259,80
	R2AP10S0K10	88,670	98,410	4,00	240

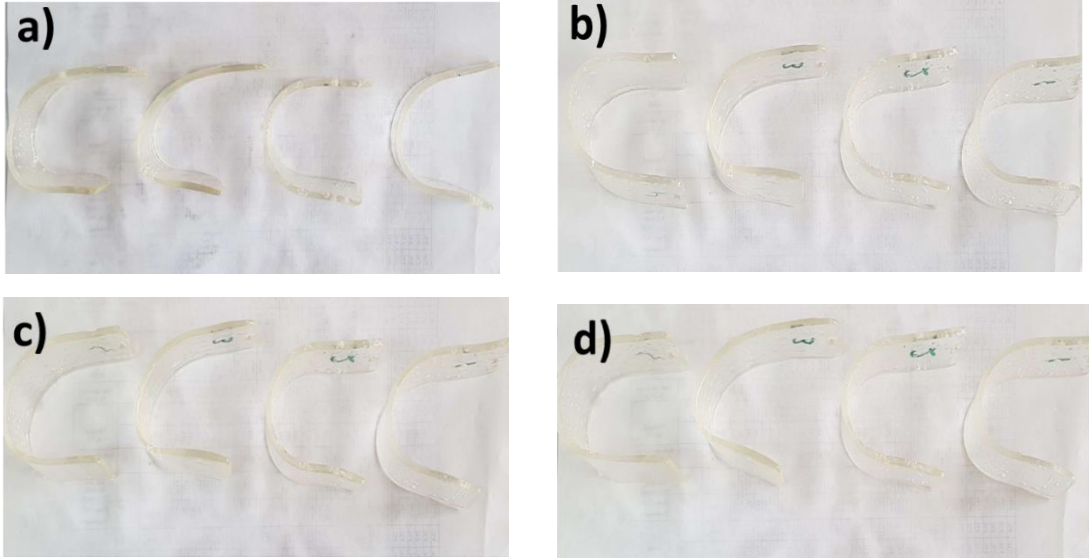
Sitrik asit



Şekil C 9. a) 90 b) 100 c) 110 d) 120 °C'de farklı sitrik asit oranları ile kürlenen saf epoksi (R1) şekil sabiti (Her görüntüde SA miktarı soldan sağa doğru azalmaktadır.)

Çizelge C 9. Farklı sıcaklıklarda farklı sitrik asit oranları ile kürlenen saf epoksi (R1) şekil hafıza özellikleri

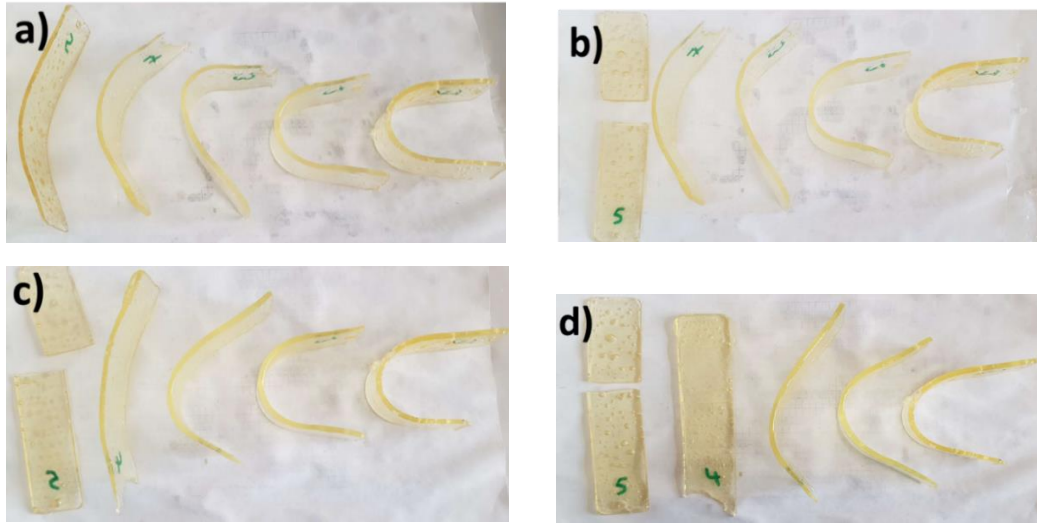
Sıcaklık (°C)	SA (w/w%)	R _f (%)	R _r (%)	t _r (dakika)	t _r (saniye)
80	18,25	90,909	96,000	4,33	260
	20	94,339	92,453	5,42	325
	25	96,078	89,571	6,33	380
	30	96,154	86,207	7,25	435
90	18,25	66,667	99,275	2,67	160
	20	53,764	95,413	3,17	190
	25	89,706	93,151	4,17	250
	30	96,364	90,385	5,17	310
100	18,25	-	-	-	-
	20	77,143	98,571	2,75	165
	25	98,361	97,386	3,40	204
	30	94,231	95,783	4,33	260
110	18,25	-	-	-	-
	20	-	-	-	-
	25	94,203	95,862	2,92	175
	30	98,182	94,375	3,33	200
120	18,25	-	-	-	-
	20	-	-	-	-
	25	86,154	98,065	1,75	105
	30	-	-	-	-



Şekil C 10. a) 90 b) 100 c) 110 d) 120 °C'de farklı sitrik asit oranları ile kürlenen saf epoksi (R2) şekil sabiti (Her görüntüde SA miktarı soldan sağa doğru azalmaktadır.)

Çizelge C 10. Farklı sıcaklıklarda farklı sitrik asit oranları ile kürlenen saf epoksi (R2) şekil hafıza özellikleri

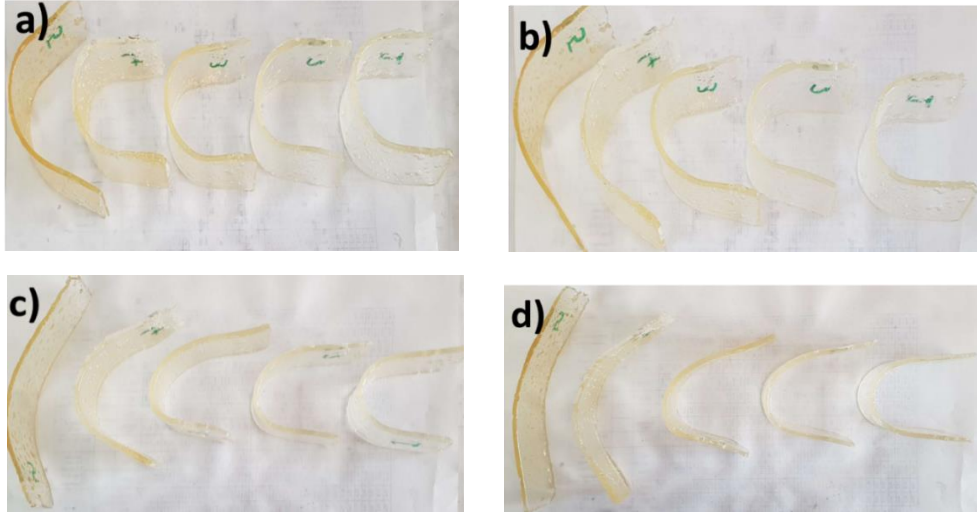
Sıcaklık (°C)	SA (w/w%)	R _f (%)	R _r (%)	t _r (dakika)	t _r (saniye)
80	18,25	97,917	97,647	3,00	180
	20	94,339	98,795	4,33	260
	25	95,161	87,097	7,50	450
	30	97,015	75,817	8,00	480
90	18,25	86,207	98,750	2,50	150
	20	95,745	97,126	3,33	200
	25	96,429	87,421	5,55	333
	30	96,078	82,036	6,17	370
100	18,25	97,959	98,276	2,42	145
	20	98,039	95,954	3,33	200
	25	96,296	89,881	5,33	320
	30	95,745	86,127	6,00	360
110	18,25	92,593	99,375	1,87	112
	20	85,714	98,214	2,50	150
	25	98,148	95,209	4,00	240
	30	98,000	92,941	4,67	280
120	18,25	90,909	98,193	1,58	95
	20	92,593	99,401	2,33	140
	25	90,625	98,734	3,58	215
	30	95,745	95,930	4,00	240



Şekil C 11. a) 80 b) 90 c) 100 d) 110 °C'de farklı PEG oranları ile kürlenlen saf epoksi (R1) şekil sabiti (Her görüntüde PEG miktarı soldan sağa doğru azalmaktadır.)

Çizelge C 11. Farklı sıcaklıklarda farklı PEG oranları ile kürlenlen saf epoksi (R1) şekil hafıza özellikleri

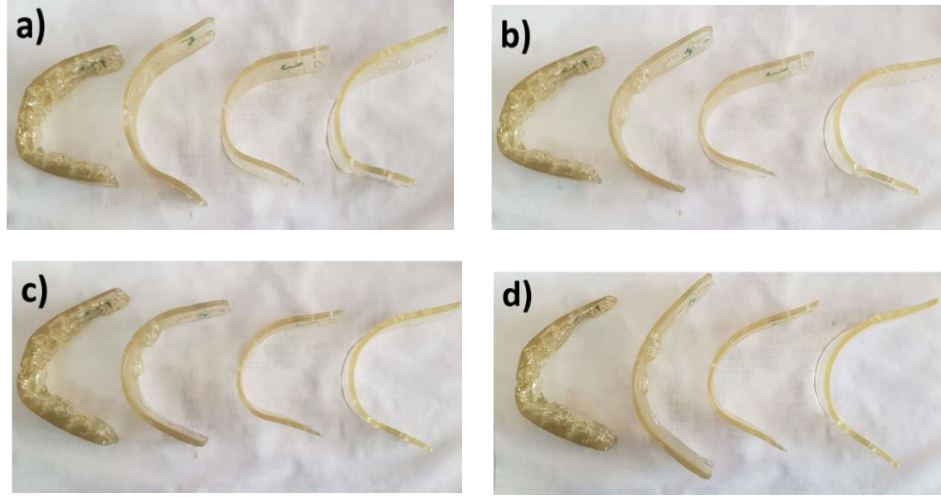
Sıcaklık (°C)	PEG (w/w%)	R _f (%)	R _r (%)	t _r (dakika)	t _r (saniye)
60	Saf epoksi	97,826	67,647	9,00	540
	R1SAP5S0K0	90,909	95,706	5,25	315
	R1SAP10S0K0	65,385	97,794	3,58	215
	R1SAP15S0K0	51,456	98,095	1,50	90
	R1SAP20S0K0	42,373	98,333	1,17	70
80	Saf epoksi	97,917	88,701	6,00	360
	R1SAP5S0K0	87,719	98,788	4,00	240
	R1SAP10S0K0	62,500	97,674	2,50	150
	R1SAP15S0K0	46,296	98,979	1,17	70
	R1SAP20S0K0	39,063	98,462	0,75	45
90	Saf epoksi	90,385	95,954	4,33	260
	R1SAP5S0K0	78,125	98,089	2,67	160
	R1SAP10S0K0	43,859	97,468	1,75	105
	R1SAP15S0K0	42,373	98,765	0,87	52
	R1SAP20S0K0	-	-	-	-
100	Saf epoksi	90,909	98,817	3,50	210
	R1SAP5S0K0	80,000	99,398	2,08	125
	R1SAP10S0K0	52,632	99,167	1,50	90
	R1SAP15S0K0	41,667	98,507	0,50	30
	R1SAP20S0K0	-	-	-	-
110	Saf epoksi	73,438	99,367	3,08	185
	R1SAP5S0K0	56,667	99,200	1,75	105
	R1SAP10S0K0	45,763	98,571	1,08	65
	R1SAP15S0K0	-	-	-	-
	R1SAP20S0K0	-	-	-	-



Şekil C 12. a) 80 b) 90 c) 100 d) 110 °C'de farklı PEG oranları ile kürlenen saf epoksi (R2) şekil sabiti (Her görüntüde PEG miktarı soldan sağa doğru azalmaktadır.)

Çizelge C 12. Farklı sıcaklıklarda farklı PEG oranları ile kürlenen saf epoksi (R2) şekil hafıza özellikleri

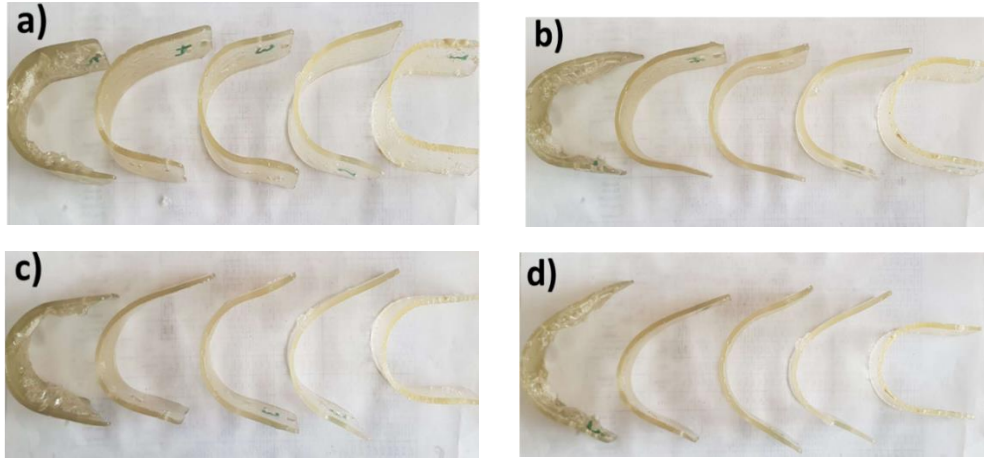
Sıcaklık (°C)	PEG (w/w%)	R _f (%)	R _r (%)	t _r (dakika)	t _r (saniye)
60	Saf epoksi	93,514	70,311	9,00	540
	R2SAP5S0K0	92,593	62,500	8,50	510
	R2SAP10S0K0	96,000	92,025	5,75	345
	R2SAP15S0K0	92,308	98,026	3,10	186
	R2SAP20S0K0	62,821	99,286	1,42	85
80	Saf epoksi	85,714	79,412	7,33	440
	R2SAP5S0K0	95,833	88,372	6,42	385
	R2SAP10S0K0	90,000	97,126	4,00	240
	R2SAP15S0K0	92,157	98,857	2,17	130
	R2SAP20S0K0	58,824	98,519	1,08	65
90	Saf epoksi	76,786	85,796	5,67	340
	R2SAP5S0K0	90,909	95,882	5,17	310
	R2SAP10S0K0	80,000	99,379	3,08	185
	R2SAP15S0K0	58,537	99,231	1,58	95
	R2SAP20S0K0	49,505	99,000	0,78	47
100	Saf epoksi	94,339	87,952	5,42	325
	R2SAP5S0K0	90,741	98,780	3,58	215
	R2SAP10S0K0	82,258	99,355	2,33	140
	R2SAP15S0K0	55,056	99,338	1,20	72
	R2SAP20S0K0	38,462	98,837	0,42	25
110	Saf epoksi	92,308	94,611	4,17	250
	R2SAP5S0K0	81,967	98,750	2,92	175
	R2SAP10S0K0	68,000	99,310	1,92	115
	R2SAP15S0K0	45,045	98,824	0,83	50
	R2SAP20S0K0	37,313	98,000	0,17	10



Şekil C 13. a) 80 b) 90 c) 100 d) 110 °C'de SA ile kürlenen R1SAP5S0Kz kompozitlerinin sabit şekli (Her görüntüde kolemanit miktarı soldan sağa doğru azalmaktadır.)

Çizelge C 13. Farklı kolemanit oranları kullanıldığında farklı sıcaklıklarda SA ile kürlenen R1 kompozitlerinin şekil hafızası özellikleri

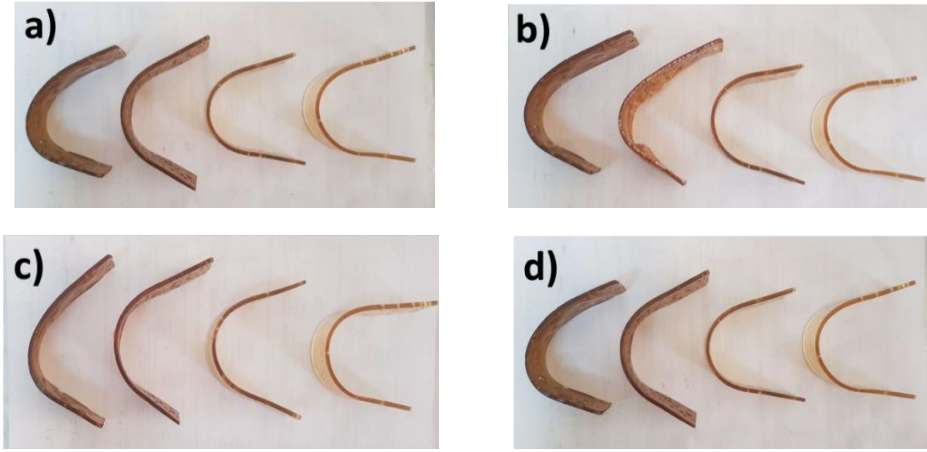
Sıcaklık (°C)	Kolemanit (w/w%)	R _r (%)	R _r (%)	t _r (dakika)	t _r (saniye)
80	R1SAP5S0K0	87,719	98,789	4,00	240
	R1SAP5S0K1	85,714	98,089	2,50	150
	R1SAP5S0K3	83,333	98,750	2,90	174
	R1SAP5S0K5	63,158	98,582	2,08	125
	R1SAP5S0K10	84,483	97,468	2,75	165
90	R1SAP5S0K0	78,125	98,089	2,67	160
	R1SAP5S0K1	80,328	98,709	1,83	110
	R1SAP5S0K3	85,938	98,693	2,07	124
	R1SAP5S0K5	60,000	97,857	2,00	120
	R1SAP5S0K10	76,923	97,351	2,33	140
100	R1SAP5S0K0	80,000	98,398	2,08	125
	R1SAP5S0K1	73,846	98,693	1,67	100
	R1SAP5S0K3	85,000	98,750	1,75	105
	R1SAP5S0K5	68,182	98,077	1,58	95
	R1SAP5S0K10	71,233	97,931	1,92	115
110	R1SAP5S0K0	56,667	98,200	1,75	105
	R1SAP5S0K1	64,103	98,582	1,42	85
	R1SAP5S0K3	72,857	97,945	1,50	90
	R1SAP5S0K5	54,118	98,319	1,33	80
	R1SAP5S0K10	66,667	97,902	1,58	95



Şekil C 14. a) 80 b) 90 c) 100 d) 110 °C'de SA ile kürlenen R2SAP5S0Kz kompozitlerinin sabit şekli (Her görüntüde kolemanit miktarı soldan sağa doğru azalmaktadır.)

Çizelge C 14.. Farklı kolemanit oranları kullanıldığında farklı sıcaklıklarda SA ile kürlenen R2 kompozitlerinin şekil hafızası özellikleri

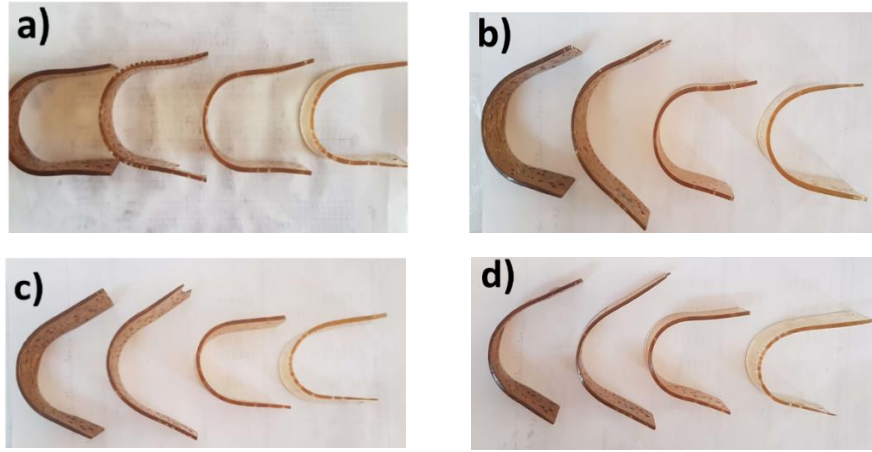
Sıcaklık (°C)	Kolemanit (w/w%)	R _r (%)	R _r (%)	t _r (dakika)	t _r (saniye)
80	R2SAP10S0K0	97,826	95,930	3,75	225
	R2SAP10S0K1	83,333	96,894	2,60	156
	R2SAP10S0K3	85,965	98,182	3,38	203
	R2SAP10S0K5	91,379	98,750	4,00	240
	R2SAP10S0K10	90,909	92,073	5,00	300
90	R2SAP10S0K0	97,826	98,824	2,17	130
	R2SAP10S0K1	84,746	98,750	2,00	120
	R2SAP10S0K3	84,211	98,159	2,33	140
	R2SAP10S0K5	81,356	98,182	2,50	150
	R2SAP10S0K10	87,931	95,706	3,33	200
100	R2SAP10S0K0	97,826	98,851	1,75	105
	R2SAP10S0K1	73,973	98,571	1,67	100
	R2SAP10S0K3	73,529	98,693	1,83	110
	R2SAP10S0K5	75,385	98,667	2,17	130
	R2SAP10S0K10	89,286	94,339	2,67	160
110	R2SAP10S0K0	97,826	98,246	1,67	100
	R2SAP10S0K1	70,667	98,571	1,27	76
	R2SAP10S0K3	59,756	98,462	1,33	80
	R2SAP10S0K5	69,333	97,872	1,50	90
	R2SAP10S0K10	61,446	94,656	1,75	105



Şekil C 15. a) 80 b) 90 c) 100 d) 110 °C'de SA ile kürlenene R1SAP5SyK0 kompozitlerinin sabit şekli (Her görüntüde sepiyolit miktarı soldan sağa doğru azalmaktadır.)

Çizelge C 15. Farklı sepiyolit oranları kullanıldığında farklı sıcaklıklarda SA ile kürlenene R1 kompozitlerinin şekil hafızası özellikleri

Sıcaklık (°C)	Sepiyolit (w/w%)	R _r (%)	R _r (%)	t _r (dakika)	t _r (saniye)
80	R1SAP5S0K0	87,719	98,788	4,00	240
	R1SAP5S1K0	97,826	97,727	3,58	215
	R1SAP5S3K0	93,750	97,714	3,67	220
	R1SAP5S5K0	96,923	98,065	2,83	170
	R1SAP5S10K0	86,207	98,333	2,92	175
90	R1SAP5S0K0	78,125	98,089	2,67	160
	R1SAP5S1K0	94,339	98,824	2,17	130
	R1SAP5S3K0	80,000	98,773	1,58	95
	R1SAP5S5K0	70,513	98,462	1,83	110
	R1SAP5S10K0	76,923	98,571	1,88	113
100	R1SAP5S0K0	80,000	98,398	2,08	125
	R1SAP5S1K0	90,909	99,412	1,83	110
	R1SAP5S3K0	75,758	99,338	1,42	85
	R1SAP5S5K0	68,513	97,762	1,67	100
	R1SAP5S10K0	60,227	99,187	1,67	100
110	R1SAP5S0K0	56,667	98,200	1,75	105
	R1SAP5S1K0	83,333	99,355	1,33	80
	R1SAP5S3K0	81,667	99,375	1,00	60
	R1SAP5S5K0	67,513	97,962	1,08	65
	R1SAP5S10K0	68,493	99,286	1,17	70

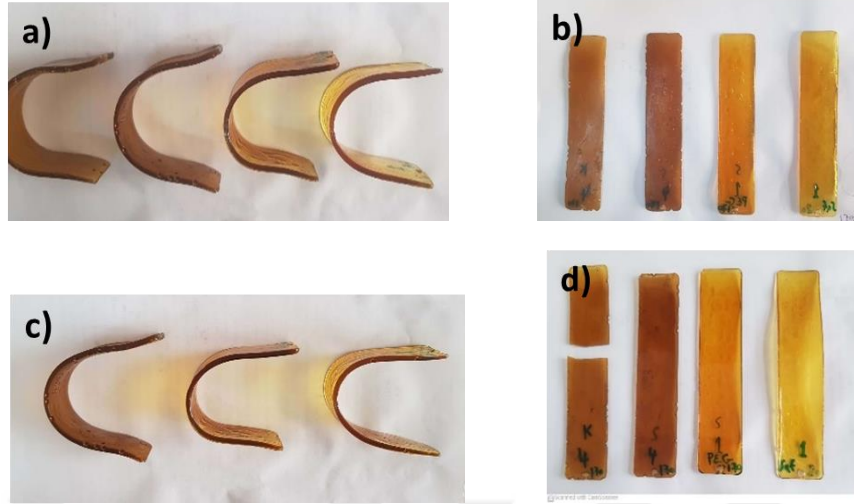


Şekil C 16. a) 80 b) 90 c) 100 d) 110 °C'de SA ile kürlenen R2SAP5SyK0 kompozitlerinin sabit şekli (Her görüntüde sepiyolit miktarı soldan sağa doğru azalmaktadır.)

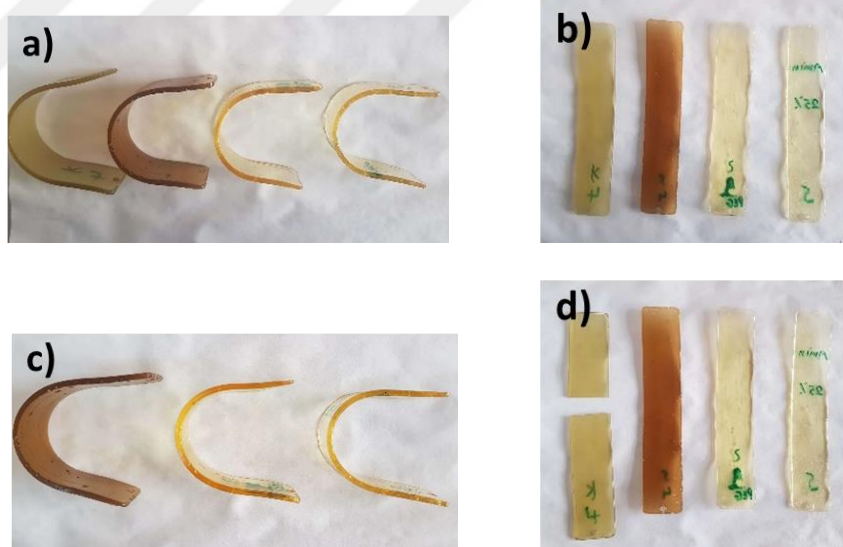
Çizelge C 16. Farklı sepiyolit oranları kullanıldığında farklı sıcaklıklarda SA ile kürlenen R2 kompozitlerinin şekil hafızası özellikleri

Sıcaklık (°C)	Sepiyolit (w/w%)	R _r (%)	R _r (%)	t _r (dakika)	t _r (saniye)
80	R2SAP10S0K0	97,826	95,930	3,75	225
	R2SAP10S1K0	96,000	94,382	5,67	340
	R2SAP10S3K0	92,308	98,870	3,83	230
	R2SAP10S5K0	80,000	98,802	3,67	220
	R2SAP10S10K0	81,356	98,824	3,50	210
90	R2SAP10S0K0	97,826	98,824	2,17	130
	R2SAP10S1K0	94,231	95,833	2,17	130
	R2SAP10S3K0	90,909	98,802	2,08	125
	R2SAP10S5K0	58,139	98,462	1,58	95
	R2SAP10S10K0	70,000	98,709	1,50	90
100	R2SAP10S0K0	97,826	98,851	1,75	105
	R2SAP10S1K0	98,039	97,674	2,08	125
	R2SAP10S3K0	87,037	98,809	1,92	115
	R2SAP10S5K0	56,818	98,462	1,50	90
	R2SAP10S10K0	66,250	98,519	1,42	85
110	R2SAP10S0K0	97,826	98,246	1,67	100
	R2SAP10S1K0	90,000	98,750	1,67	100
	R2SAP10S3K0	88,333	99,371	1,58	95
	R2SAP10S5K0	55,556	99,231	1,25	75
	R2SAP10S10K0	62,353	99,231	1,17	70

Ekler D: Şekil hafıza döngüsü



Şekil D 1. MNA ile kürlenmiş R1 kompozitlerinin ilk döngüdeki a) Sabit ve b) geri kazanım şekli ve son döngüdeki c) sabit ve d) geri kazanım şekli (her görüntüde sağdan sola: saf epoksi (R1), R1MP10S0K0, R1MP1050K0 ve R1MP10S0K5)



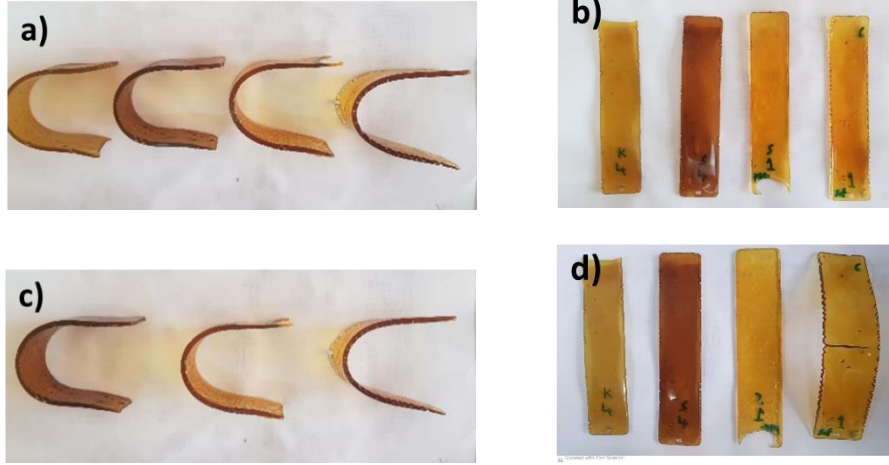
Şekil D 2. Sikloalifatik poliamin ile kürlenmiş R1 kompozitlerinin ilk döngüdeki a) Sabit ve b) geri kazanım şekli ve son döngüdeki c) sabit ve d) geri kazanım şekli (her görüntüde sağdan sola: saf epoksi (R1), R1AP10S0K0, R1AP10S5K0 ve R1AP10S0K5)

Çizelge D 1. 110 °C'de MNA ile kürlenene R1 kompozitlerinin şekil hafıza döngüsünün özellikleri

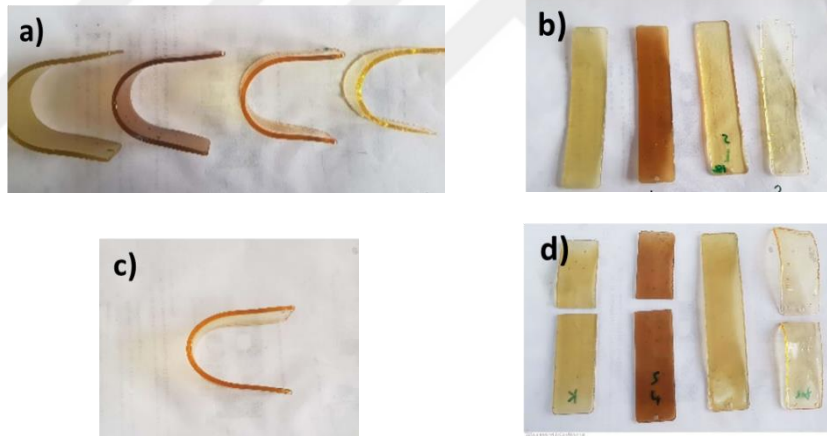
Sertleştirici	Numune	Döngü	R _f (%)	R _r (%)	t _r (dakika)	t _r (saniye)
MNA %30	Saf epoksi (R1)	1	95,745	97,633	5,83	349,80
		2	98,000	96,988	5,33	319,80
		3	98,000	96,450	5,42	325,20
		4	93,750	96,970	5,50	330
		5	96,000	95,732	5,83	349,80
		6	96,000	95,238	5,67	340,20
		7	95,745	93,567	5,50	330
		8	96,078	95,210	5,33	319,80
		9	96,078	95,758	5,83	349,80
		10	95,833	94,578	5,67	340,20
	R1MP10S0K0	1	94,340	98,817	3,25	195
		2	96,154	98,810	3,08	184,80
		3	98,039	98,795	3,00	180
		4	92,453	98,193	2,83	169,80
		5	96,154	98,788	2,83	169,80
		6	96,154	98,225	2,67	160,20
		7	94,340	97,590	2,42	145,20
		8	98,039	97,006	2,47	148,20
		9	94,340	97,561	2,33	139,80
		10	94,340	96,988	2,33	139,80
	R1MP10S5K0	1	90,741	99,394	1,75	105
		2	89,286	99,383	1,67	100,20
		3	90,741	99,367	1,70	102
		4	84,746	99,383	1,50	90
		5	87,720	99,379	1,67	100,20
		6	84,746	99,363	1,58	94,80
		7	84,483	99,371	2,08	124,80
		8	87,931	99,383	2,17	130,20
		9	84,746	99,371	2,12	127,20
		10	82,258	99,405	2,08	124,80
	R1MP10S0K5	1	94,340	98,795	2,58	154,80
		2	92,593	98,810	1,83	109,80
		3	94,340	98,788	2,25	135
		4	90,909	98,765	1,83	109,80
		5	92,593	98,765	1,67	100,20
		6	87,273	98,773	1,50	90
		7	89,286	98,788	1,42	85,20
		8	-	-	-	-
		9	-	-	-	-
		10	-	-	-	-

Çizelge D 2. 110 °C'de sikloalifatik poliamin ile kürlenene R1 kompozitlerinin şekil hafızası döngüsü özellikleri

Sertleştirici	Numune	Döngü	R _f (%)	R _r (%)	t _r (dakika)	t _r (saniye)
Sikloalifatik poliamin %25	Saf epoksi (R1)	1	97,959	98,788	4,42	265,20
		2	96,154	99,394	4,42	265,20
		3	98,039	98,182	4,83	289,80
		4	96,000	98,824	4,67	280,20
		5	98,000	98,788	4,50	270
		6	96,000	98,810	4,33	259,80
		7	97,959	98,236	4,67	280,20
		8	96,000	98,182	4,83	289,80
		9	98,000	98,225	4,50	270
		10	98	97,633	4,92	295,20
	R1AP10S0K0	1	96,154	98,802	3,67	220,20
		2	94,340	99,405	3,50	210
		3	92,453	98,773	3,83	229,80
		4	90,909	98,438	3,33	199,80
		5	96,078	98,810	3,50	210
		6	92,453	99,394	3,50	210
		7	94,231	98,810	3,33	199,80
		8	92,593	98,802	2,92	175,20
		9	92,453	98,817	3,42	205,20
		10	91,071	99,375	3,33	199,80
	R1AP10S5K0	1	92,453	98,750	2,92	175,20
		2	92,453	99,390	2,83	169,80
		3	90,909	98,750	3,33	199,80
		4	87,273	99,383	2,50	150
		5	90,741	98,788	3,12	187,20
		6	85,965	99,375	3,42	205,20
		7	89,091	98,742	2,92	175,20
		8	89,286	99,363	3,08	184,80
		9	92,453	99,401	3,25	195
		10	94,444	98,780	3,50	210
	R1AP10S0K5	1	90,741	98,734	2,50	150
		2	89,286	99,375	2,50	150
		3	89,091	98,182	3,00	180
		4	90,909	99,379	2,83	169,80
		5	89,286	98,765	3,12	187,20
		6	90,909	98,750	2,75	165
		7	-	-	-	-
		8	-	-	-	-
		9	-	-	-	-
		10	-	-	-	-



Şekil D 3. MNA ile kürlen R2 kompozitlerin ilk döngüdeki a) Sabit ve b) geri kazanım şekli ve son döngüdeki c) sabit ve d) geri kazanım şekli (her görüntüde sağdan sola: saf epoksi (R2), R2MP10S0K0, R2MP10S5K0 ve R2MP10S0K5)



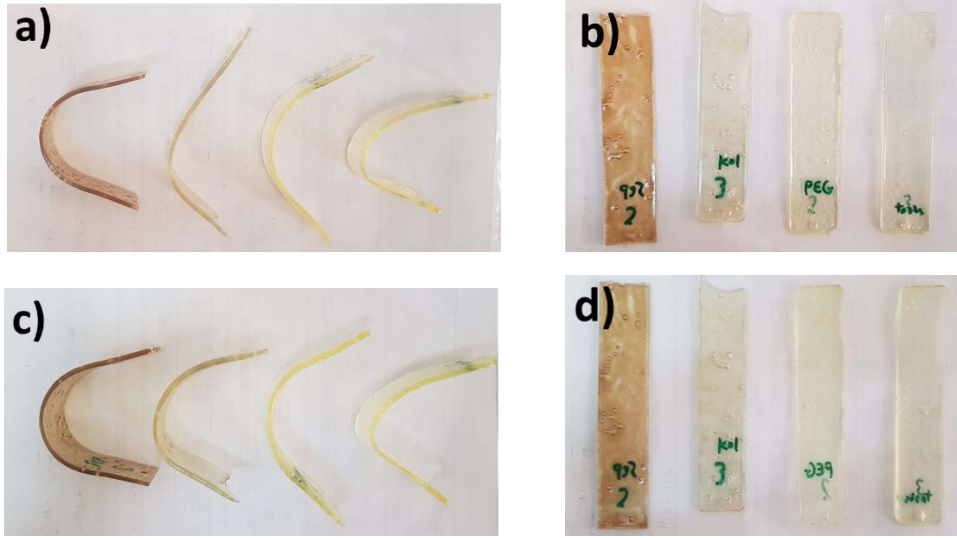
Şekil D 4. Sikloalifatik poliamin ile kürlen R2 kompozitlerin ilk döngüdeki a) Sabit ve b) geri kazanım şekli ve son döngüdeki c) sabit ve d) geri kazanım şekli (her görüntüde sağdan sola: saf epoksi (R2), R2AP10S0K0, R2AP10S5K0 ve R2AP10S0K5)

Çizelge D 3. 110 °C'de MNA ile kürlenen R2 kompozitlerinin şekil hafızası döngüsü özellikleri

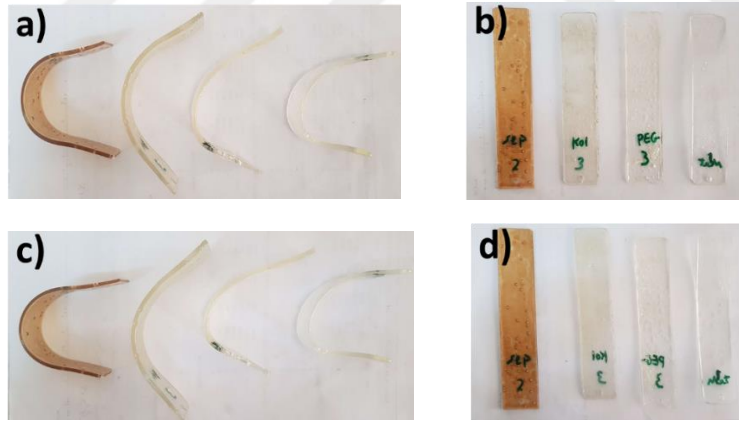
Sertleştirici	Numune	Döngü	R _r (%)	R _r (%)	t _r (dakika)	t _r (saniye)
MNA %30	Saf epoksi (R2)	1	96,667	97,576	5,17	310,20
		2	93,220	97,619	5,08	304,80
		3	96,226	97,006	5,67	340,20
		4	92,593	98,182	5,83	349,80
		5	92,308	96,296	5,55	333
		6	95,918	95,783	5,75	345
		7	92,308	96,875	6,17	370,20
		8	90,196	94,545	6,38	382,80
		9	-	-	-	-
		10	-	-	-	-
	R2MP10S0K0	1	96,000	98,795	3,33	199,80
		2	98,000	99,408	3,25	195
		3	96,000	99,412	3,27	196,20
		4	96,000	99,415	3,23	193,80
		5	93,750	99,408	3,30	198
		6	97,959	99,398	3,00	180
		7	90,196	99,383	3,08	184,80
		8	92,308	99,390	3,08	184,80
		9	92,308	99,412	3,17	190,20
		10	96,078	98,802	3,50	210
	R2MP10S5K0	1	98,000	98,830	3,00	180
		2	98,000	98,844	3,08	184,80
		3	97,959	99,419	2,92	175,20
		4	98,000	99,412	3,12	187,20
		5	96,000	99,412	3,17	190,20
		6	98,039	99,405	2,95	177
		7	94,231	99,401	3,20	192
		8	98,039	99,398	3,27	196,20
		9	97,959	99,419	3,22	193,20
		10	98,000	99,415	3,28	196,80
	R2MP10S0K5	1	90,566	99,390	3,83	299,80
		2	96,000	99,419	3,50	210
		3	97,959	99,415	3,00	180
		4	97,959	99,412	2,92	175,20
		5	97,959	98,809	2,48	148,80
		6	98,000	99,398	2,17	130,20
		7	92,453	99,383	1,83	109,80
		8	90,566	99,390	1,83	109,80
		9	90,909	99,408	2,25	135
		10	94,339	98,788	2,58	154,80

Çizelge D 4. 110°C'de sikloalifatik poliamin ile kürlen R2 kompozitlerinin şekil hafızası döngüsü özellikleri

Sertleştirici	Numune	Döngü	R _f (%)	R _r (%)	t _r (dakika)	t _r (saniye)
Sikloalifatik poliamin %25	Saf epoksi (R2)	1	98,330	97,580	5,42	325,20
		2	97,960	97,030	5,30	318
		3	98,080	95,810	6,50	390
		4	98,040	97,010	6,50	390
		5	96,150	96,930	6,50	390
		6	95,920	95,760	6,75	405
		7	96,150	96,890	6,75	405
		8	-	-	-	-
		9	-	-	-	-
		10	-	-	-	-
	R2AP10S0K0	1	96,000	99,410	5,28	316,80
		2	94,120	99,400	5,33	319,80
		3	94,340	99,400	5,55	333
		4	96,150	98,820	5,23	313,80
		5	90,910	98,170	5,08	304,80
		6	92,450	98,220	4,83	289,80
		7	90,570	98,810	4,92	295,20
		8	90,570	98,180	5,35	321
		9	90,570	98,210	5,22	313,20
		10	90,570	98,210	5,37	322,20
	R2AP10S5K0	1	92,980	98,780	4,67	280,20
		2	94,550	98,240	4,50	270
		3	92,590	98,160	4,83	289,80
		4	94,230	97,650	4,75	285
		5	92,310	98,210	5,00	300
		6	88,890	98,210	4,50	270
		7	90,910	98,770	4,63	277,80
		8	90,910	98,170	4,33	259,80
		9	-	-	-	-
		10	-	-	-	-
	R2AP10S0K5	1	89,290	98,770	4,92	295,20
		2	90,910	98,770	4,67	280,20
		3	92,590	98,760	4,83	289,80
		4	94,230	98,770	4,33	259,80
		5	89,280	98,120	4,13	247,80
		6	92,450	98,180	3,50	210
		7	87,500	98,760	3,08	184,80
		8	89,470	98,120	2,75	165
		9	-	-	-	-
		10	-	-	-	-



Şekil D 5. SA ile kürlenene R1 kompozitlerin ilk döngüdeki a) Sabit ve b) geri kazanım şekli ve son döngüdeki c) sabit ve d) geri kazanım şekli (her görüntüde sağdan sola: saf epoksi (R1), R1SAP10S0K0, R1SAP10S0K3 ve R1SAP10S3K0)



Şekil D 6. SA ile kürlenene R2 kompozitlerin ilk döngüdeki a) Sabit ve b) geri kazanım şekli ve son döngüdeki c) sabit ve d) geri kazanım şekli (her görüntüde sağdan sola: saf epoksi (R2), R2SAP10S0K0, R2SAP10S0K3 ve R2SAP10S3K0)

Çizelge D 5. 100°C'de SA ile kürlenene R1 kompozitlerinin şekil hafıza döngüsünün özellikleri

Sertleştirici	Numune	Döngü	R _f (%)	R _r (%)	t _r (dakika)	t _r (saniye)
SA %25	Saf epoksi (R1)	1	98,361	97,386	3,40	204
		2	88,709	96,774	2,50	150
		3	81,667	95,333	2,83	170
		4	78,462	97,260	2,67	160
		5	76,923	96,667	2,58	155
		6	83,333	93,589	2,67	160
		7	90,000	86,842	2,92	175
		8	94,643	95,597	2,67	160
		9	91,667	95,484	2,75	165
		10	72,973	95,489	2,67	160
	R1SAP5S0K0	1	80,000	98,398	2,08	125
		2	52,041	97,368	1,67	100
		3	58,824	98,507	1,92	115
		4	52,427	97,143	1,68	101
		5	53,535	94,167	1,42	85
		6	52,041	90,909	1,58	95
		7	56,522	91,736	2,00	120
		8	46,364	94,565	1,67	100
		9	58,889	87,705	1,68	101
		10	59,783	88,983	1,83	110
	R1SAP5S3K0	1	75,758	99,338	1,42	85
		2	60,606	98,947	1,00	60
		3	75,000	99,242	1,25	75
		4	55,556	99,130	1,28	77
		5	52,632	99,091	1,08	65
		6	49,019	99,000	1,17	70
		7	58,824	99,167	1,20	72
		8	53,192	99,130	1,25	75
		9	60,000	99,130	1,22	73
		10	73,529	98,592	1,47	88
	R1SAP5S0K3	1	85,000	98,750	1,75	105
		2	74,627	99,346	1,33	80
		3	73,529	99,342	1,33	80
		4	86,207	99,387	1,50	90
		5	78,333	99,342	1,17	70
		6	80,952	98,709	1,25	75
		7	67,568	99,296	1,17	70
		8	64,935	98,571	1,33	80
		9	62,500	99,259	1,28	77
		10	76,563	98,709	1,75	105

Çizelge D 6. 100°C'de SA ile kürlen R2 kompozitlerinin şekil hafıza döngüsünün özellikleri

Sertleştirici	Numune	Döngü	R _f (%)	R _r (%)	t _r (dakika)	t _r (saniye)
SA %25	Saf epoksi (R2)	1	94,339	87,952	5,42	325
		2	93,220	95,625	4,00	240
		3	92,308	93,056	4,17	250
		4	96,000	93,939	4,58	275
		5	98,039	94,083	4,62	277
		6	94,339	95,858	3,83	230
		7	94,545	89,222	4,67	280
		8	96,226	90,000	4,80	288
		9	90,566	89,535	4,17	250
		10	94,545	87,879	4,57	274
	R2SAP10S0K0	1	97,826	98,851	1,75	105
		2	70,129	97,857	1,67	100
		3	74,359	97,727	1,75	105
		4	60,000	98,065	1,92	115
		5	63,291	97,778	1,83	110
		6	60,241	99,248	1,37	82
		7	75,342	98,667	1,67	100
		8	67,568	96,429	1,88	113
		9	72,857	98,000	1,75	105
		10	65,789	97,143	2,08	125
	R2SAP10S3K0	1	87,037	98,809	1,92	115
		2	55,435	97,321	1,00	60
		3	62,500	98,571	1,00	60
		4	56,667	99,180	1,25	75
		5	57,609	99,153	1,00	60
		6	50,000	99,074	1,00	60
		7	57,895	99,091	1,08	65
		8	48,077	99,019	1,25	75
		9	48,077	99,065	1,25	75
		10	47,619	97,979	1,33	80
	R2SAP10S0K3	1	73,529	98,693	1,83	110
		2	83,871	99,363	1,50	90
		3	83,333	99,367	1,58	95
		4	80,000	98,758	1,83	110
		5	83,077	99,342	1,50	90
		6	62,500	99,301	1,25	75
		7	6,849	98,621	1,58	95
		8	62,500	98,592	1,83	110
		9	57,778	99,200	1,38	83
		10	83,333	98,773	2,08	125

YAYINLAR

Makale

- Almezgagi, M., Güzel Kaya, G., and Deveci, H., Thermo-responsive shape memory behavior of epoxy with different combinations of curing agents and filler materials, *Journal of Applied Polymer Science*, 142(21), 2025. (**Doktora tezinden yapılmıştır.**)
- Almezgagi, M., Güzel Kaya, G., Kar, Y., and Deveci, H., Biochar produced from co-pyrolysis of olive pomace & crude oil as an adsorbent for Cr (VI) removal from aqueous solutions, *Iranian Journal of chemistry and chemical engineering*, 21(4), 2022. (**Yüksek lisans tezinden yapılmıştır.**)

Bildiri

- Almezgagi, M., Güzel Kaya, G., and Deveci, H., Methylene blue adsorption and desorption performance of silane treated pine cone in a short time, *Annual International Congress on Chemistry*, Oxford, United Kingdom, 27-28 March 2025. (Online Oral presentation).
- Almezgagi, M., Güzel Kaya, G., and Deveci, H., Synthesis and shape memory properties of peg/epoxy composites including colemanite as a filler material, *ICRETS International Conference on Research in Engineering Technology and Science*, Tashkent-Uzbekistan, 22-25 August, 2024. (Poster). (**Doktora tezinden yapılmıştır.**)
- Almezgagi, M., Güzel Kaya, G., and Deveci, H., Shape memory behavior of black cumin char/epoxy with different molecular weight of polyethylene glycol, *VCCA Virtual Conference on Chemistry and Its Application*, 12-16 August, 2024. (Online Oral presentation).
- Almezgagi, M., Güzel Kaya, G., and Deveci, H., The Effects of Curing Agent and Filler on Shape Memory Properties of Epoxy Composites, *14th International Fiber and Polymer Research Symposium*, Bursa,Türkiye, 24-25 May, 2024. (Oral presentation). (**Doktora tezinden yapılmıştır.**)
- Almezgagi, M., Güzel Kaya, G., and Deveci, H., Acrylamide/sodium acrylate/polyethylene glycol/kaolin composite hydrogels for removal of methylene blue: dye adsorption isotherms and kinetics, *ISESER2023 International Symposium for Environmental Science and Engineering Research*, Konya, Türkiye, 18-21 October, 2023. (Oral presentation).
- Almezgagi, M., Güzel Kaya, G., and Deveci, H., Methylene Blue Adsorption on Sodium Dodecyl Sulfate Modified Chalcopyrite, *6th International Eurasian Conference on Biological and Chemical sciences*, Ankara, Türkiye, 11-13 October, 2023. (Online Oral presentation).
- Almezgagi, M., Güzel Kaya, G., and Deveci, H., Fizikokimyasal modifikasyon işlemi uygulanmış uçucu külün adsorpsiyon prosesi ile sulu çözeltilerden katyonik boya giderim performansının incelenmesi, *15th International Chemical Engineering Symposium*, Çanakkale, Türkiye, 04-07 September, 2023. (Oral presentation).

- Almezgagi, M., Guzel Kaya, G., and Deveci, H. Biochar produced from pyrolysis of olive pomace as an adsorbent for Cr (VI) removal from aqueous solutions, *ISESER2019 International Symposium for Environmental Science and Engineering Research*, Konya, Türkiye, 25-27 May, 2019. (Oral presentation). (Yüksek lisans tezinden yapılmıştır.)

