



**ORGANOKİL TAKVİYELİ MELAMİN
FORMALDEHİT KÖPÜKLERİN (OKMFK)
MİKRODALGA IŞINLAMA TEKNİĞİ İLE SENTEZİ
VE KARAKTERİZASYONU**

Elif ŞAHİN

Doktora Tezi
Nanobilim ve Nanomühendislik Ana Bilim Dalı
Prof. Dr. Ahmet GÜRSES
2024
(Her hakkı saklıdır).

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
NANOBİLİM NANOMÜHENDİSLİK ANABİLİM DALI

**ORGANOKİL TAKVİYELİ MELAMİN FORMALDEHİT KÖPÜKLERİN (OKMFK)
MİKRODALGA IŞINLAMA TEKNİĞİ İLE SENTEZİ VE KARAKTERİZASYONU**

(The Synthesis and Characterization by Microwave Irradiation Technique of Organoclay-
Reinforced Melamine Formaldehyde Foams (OCMFF))

DOKTORA TEZİ

Elif ŞAHİN

Danışman: Prof. Dr. Ahmet GÜRSES

Erzurum
Temmuz, 2024

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Elif ŞAHİN tarafından hazırlanan “**Organokil Takviyeli Melamin Formaldehit Köpüklerin (OKMEK) Mikrodalga Işınlama Tekniği ile Sentezi ve Karakterizasyonu**” başlıklı çalışması 17/07/2024 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Nanobilim ve Nanomühendislik Ana Bilim Dalı, Nanobilim ve Nanomühendislik Bilim Dalında doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Hayrunnisa NADAROĞLU <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Danışman:	Prof. Dr. Ahmet GÜRSES <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Nurtaç CANPOLAT <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Metin AÇIKYILDIZ <i>Kilis 7 Aralık Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Salih AKPINAR <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN
Enstitü Müdürü

Aslı ıslak imzalıdır

Bu çalışma Atatürk Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) kapsamında desteklenmiştir.

Proje No: FDK-2022-10258

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Doktora Tezi olarak Prof. Dr. Ahmet GÜRSSES danışmanlığında sunulan “**Organokil Takviyeli Melamin Formaldehit Köpüklerin (OKMFK) Mikrodalga Işınlama Tekniği ile Sentezi ve Karakterizasyonu**” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	9	30
Kuramsal Temeller	11	30
Materyal ve Metot	9	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	2	20
Sonuçlar	0	20
Tezin Geneli	8	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Elif ŞAHİN	Prof. Dr. Ahmet GÜRSSES
19.8.2024	19.8.2024
İmza: Aslı Islak İmzalıdır	İmza: Aslı Islak İmzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun .../.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun .../.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu doktora tezinin planlanması, hazırlanması ve sonuçlanmasına kadar her türlü desteği veren, güler yüzünü ve samimiyetini esirgemeyen,engin bilgilerinden ve tecrübelerinden yararlandığım danışman hocam Sayın **Prof. Dr. Ahmet GÜRSES**'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu zorlu süreçte, moral motivasyon ve bilimsel desteklerini her an hissettiren, Sayın **Prof. Dr. Nurtaç CANPOLAT, Prof. Dr. Hayrunnisa NADAROĞLU, Prof. Dr. Salih AKPINAR ve Prof. Dr. Metin AÇIKYILDIZ**'a şükranlarımı sunuyorum.

Doktora sürecinde her zaman yanımda olan ve desteklerini esirgemeyen aileme ve sevgili arkadaşım Dr.Öğ. Üyesi Kübra Güneş'e teşekkürlerimi sunarım.

Veri ölçüm ve analizlerinde yardımcı olan Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM) çalışanlarına da teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmayı destekleyen BAP birimine (Proje No: FDK-2022-10258) ve destekleri için Sayın **Rektör Prof. Dr. Ömer ÇOMAKLI**'ya ayrıca teşekkürlerimi sunuyorum

Elif ŞAHİN

ÖZET

DOKTORA TEZİ

ORGANOKİL TAKVİYELİ MELAMİN FORMALDEHİT KÖPÜKLERİN (OKMFK) MİKRODALGA IŞINLAMA TEKNİĞİ İLE SENTEZİ VE KARAKTERİZASYONU

Elif ŞAHİN

Danışman: Prof. Dr. Ahmet GÜRSES

Amaç: Melamin formaldehit (MF) yüksek alevlenme ve sıcaklık dayanımı gösteren sert, çok dayanıklı ve çok yönlü bir reçinedir. Melamin ve formaldehit gibi iki başlangıç maddesinin kondensasyonu ile sentezlenen MF reçineleri, yanarken azot gazı salınımı yaptıklarından, iyi bir alev geciktirici özelliğe sahiptir. MF nano kompozitlerinin mekanik, termal ve bariyer özelliklerinin arzu edilen düzeyde olmadığı literatürde vurgulanmaktadır. Bu özelliklerin çeşitli yöntemlerle iyileştirilmesi nano kompozitlerin kullanım alanı açısından büyük önem arz etmektedir. Bu konuda literatürde önemli bir boşluğun bulunduğu söylenebilir. Bu bilgilerin ışığında sunulan çalışmada; nanokil takviyeli, çapraz bağlı MF, MUF ve MAF nano kompozitlerinin ve çeşitli hibrit kompozitlerin mikrodalga ısınlama tekniği ile sentezlenmesi ve bu kompozitlerin termal, mekanik, dokusal ve morfolojik özelliklerinin incelenmesi amaçlanmaktadır.

Metod: Bu çalışmada, mikrodalga ısınlama tekniği kullanılarak organokil takviyeli MF nano kompozit sentezi yapılacaktır. Son yıllarda, mikrodalga yardımcı organik sentezler, artan reaksiyon hızı, yüksek verim, ileri saflık, reaksiyon sonrası işlem kolaylığı nedeniyle dikkat çekmektedir.

Bulgular: Bu çalışmada, MF-organokil nanokompozitlerine çeşitli oranlarda organokil eklenmiştir. Farklı organokil oranları polimer nanokompozitlerin ısı yalıtım özellikleri, basınç dayanımları (basma direnci) ve yanı sıra hazırlanan hibrit kompozitlerin elastisite modülü ve vida tutma dayanımı gibi özelliklerinde ciddi anlamda iyileşmeler sağlamıştır. Özellikle hazırlanan nano kompozit köpüklerden, melamin anilin formaldehit-organokil (MAFKNK2) nanokompozitlerinin ısı yalıtımı özelliklerinde ($\lambda = 0,051 \text{ W /m K}$) ileri derecede iyileşmeler olduğu görülmüştür. Basma direncinin melamin formaldehit-organokil nanokompozit köpüğünde ($0,68 \text{ N/mm}^2$) melamin formaldehit köpüğe ($0,27 \text{ N/mm}^2$) göre 2,5 kat artmış olduğu görülmüştür.

Sonuçlar: Çalışmadan elde edilen bulgular, organo kil takviyesiyle hazırlanan melamin formaldehit nano kompozitlerinin ve hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerinin iyileşmesinin ötesinde, onların termal kararlılık, alev geciktiricilik, gaz bariyer ve ısı yalıtımı gibi fiziksel özelliklerinin de ileri düzeyde iyileştğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Melamin formaldehit reçinesi; Polimer köpükler; Organokil; Polimer-organokil nano kompozitler, Termal yalıtım.

Temmuz 2024, 161 sayfa

ABSTRACT

Ph. D. DISSERTATION

THE SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION BY MICROWAVE IRRADIATION TECHNIQUE OF ORGANOCLAY-REINFORCED MELAMINE FORMALDEHYDE FOAMS (OCMFF)

Elif ŞAHİN

Supervisor: Prof. Dr. Ahmet GÜRSES

Purpose: Melamine formaldehyde (MF) is a hard, very durable and versatile resin with high flammability and temperature resistance. MF resins, synthesized by the condensation of two monomers such as melamine and formaldehyde, have good flame-retardant properties as they release nitrogen gas when burning. It is emphasized in the literature that the mechanical, thermal and barrier properties of MF nano composites are not at the desired level. Improving these properties by various methods is of great importance in terms of the usage area of nanocomposites. It can be said that there is a significant gap in the literature on this subject. In the light of this information, the aim of the presented study is to synthesize nanoclay reinforced, cross-linked MF, MUF and MAF nano composites and various hybrid composites by microwave irradiation technique and to investigate the thermal, mechanical, textural and morphological properties of these composites.

Method: In this study, clay reinforced MF nano composite will be synthesized using microwave irradiation technique. In recent years, microwave-assisted organic syntheses have attracted attention due to their increased reaction rate, high yield, advanced purity, and ease of post-reaction operation.

Findings: In this study, organoclay was added to MF-organoclay nanocomposites at various ratios. Different organoclay ratios provided significant improvements in the thermal insulation properties, compressive strength (compression resistance) of polymer nanocomposites, as well as the elasticity modulus and screw retention strength of the prepared hybrid composites. Especially, it was observed that there were significant improvements in the thermal insulation properties ($\lambda=0.051$ W/m K) of melamine aniline formaldehyde-organoclay (MAFKNK2) nanocomposites from the prepared nanocomposite foams. It was observed that the compressive strength increased 2.5 times in melamine formaldehyde-organoclay nanocomposite foam (0.68 N/mm²) compared to melamine formaldehyde foam (0.27 N/mm²).

Results: The findings obtained from the study showed that beyond the improvement of mechanical properties of melamine formaldehyde nano composites and hybrid composites prepared with organo clay reinforcement, their physical properties such as thermal stability, flame retardancy, gas barrier and thermal insulation were also significantly improved.

Keywords: Melamine formaldehyde resin; Polymer foams; Organo clay; Polymer/organo clay nano composites, Thermal insulation.

July 2024, 161 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
KISALMALAR DİZİNİ.....	xv
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	4
Nanoteknolojinin Tanımı ve Kullanım Alanları	4
Polimer	5
Polimer tipleri	6
Polimerizasyon reaksiyonları	12
Polimerlerin kullanım alanları.....	17
Kil Mineralleri.....	22
Kil minerallerinin sınıflandırılması.....	25
Kil minerallerinin özellikleri.....	33
Organokil	35
Organokillerin sentezi	37
Organokillerin kullanım alanları	38
Polimer/Kil Nanokompozitlerin Yapısı	39
Mikro-Kompozit (Faz Ayrışık) yapı	41
Aralanmış tabakalı (interkale) yapı	41
Pul pul dağılmış tabakalı (Eksfoliye) yapı	41
Karışık yapı	42
Polimer/Kil Nanokompozitlerinin Sentezi	42
In-situ (Eş-zamanlı) polimerizasyon	42
Çözeltide harmanlama (İnterkalasyon)	43
Eriyik harmanlama	44

Polimer/kil nanokompozitlerinin özellikleri	45
Polimer/kil nanokompozitlerinin mekanik özellikleri	45
Polimer/kil nanokompozitlerinin termal özellikleri	45
Polimer/kil nanokompozitlerinin bariyer özellikleri	46
Polimer/kil nanokompozitlerinin reolojik özellikleri	46
Hibrit Kompozitler	46
Çalışmanın Amacı	62
MATERYAL VE YÖNTEM	63
Materyal	63
Deneysel Yöntemler	64
Organokilin hazırlanması	64
Melamin formaldehit önpolimeri (MF) ve MF-organokil nanokompozitlerin hazırlanması	65
Melamin anilin formaldehit ön-polimeri (MAF) ve MAF-organokil nanokompozitlerinin hazırlanması	67
Melamin formaldehit ön-polimeri (MF), MF-organokil nanokompozit ve hibrit kompozitlerin hazırlanması	68
Dokusal, Yapısal, Mekanik ve Termal Analizler	70
Spektroskopik analiz	70
Bu çalışmada melamin-formaldehit nanokompozit (MF), melamin formaldehit-organokil kompozitler (MFK), melamin üre formaldehit-organokil kompozitler (MUF), melamin anilin formaldehit-organokil kompozitlerin (MAF) ve hibrit kompozitlerin spektroskopik olarak XRD ve FT-IR analizleri yapılmıştır	70
Fourier dönüşümlü infrared spektroskopisi (FT-IR) analizi	70
X-ışını difraksiyonu (XRD) analizi	70
Morfolojik analiz	70
Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi	70
Yüksek çözünürlüklü geçirimli elektron mikroskobu (HRTEM)	71
Mekanik Testler	71
Isı İletim Katsayısı Ölçümü	71
ARAŞTIRMA BULGULARI	72
Melamin Formaldehit Köpük (MF) ve MF-Organokil Nanokompozitlerine Ait Bulgular	72
Melamin formaldehit köpük (MF) ve melamin formaldehit organokil nanokompozitlerinin (MFKNK) dokusal karakterizasyonu	72

Melamin formaldehit köpük (MF) ve melamin formaldehit organokil nanokompozitlerinin (MFKNK) yüzey morfolojik karakterizasyonu	74
Melamin formaldehit köpük (MF) ve melamin formaldehit organokil nanokompozitlerinin (MFKNK) FT-IR spektrumlarının analizi	75
Melamin formaldehit köpük (MF) ve melamin formaldehit organokil nanokompozitlerinin (MFKNK) mineralojik yapılarının karakterizasyonu	76
Melamin formaldehit köpük (MF) ve melamin formaldehit organokil nanokompozitlerinin (MFKNK) ısı iletkenlikleri	76
Melamin formaldehit köpük (MF) ve melamin formaldehit organokil nanokompozitlerinin yoğunluklarının ve basma dirençlerinin bileşimlerine bağılılığı ...	77
Melamin Formaldehit Köpük (MF), Melamin Üre Formaldehit Köpük (MUF) ve Melamin Üre Formaldehit Organokil Nanokompozitlerine (MUFKNK) Ait Bulgular	78
Melamin formaldehit köpük (MF), melamin üre formaldehit köpük (MUF) ve melamin üre formaldehit organokil nanokompozitlerinin (MUFKNK) dokusal karakterizasyonu	78
Melamin formaldehit köpüğü (MF), melamin üre formaldehit köpüğü (MUF) melamin formaldehit organokil nanokompozitlerinin (MUFKNK1-3) yüzey morfolojik karakterizasyonu	80
Melamin formaldehit köpük (MF), melamin üre formaldehit köpük (MUF) ve melamin üre formaldehit organokil nanokompozitlerinin (MUFKNK) FT-IR analizi...	82
Melamin formaldehit köpük (MF), melamin üre formaldehit köpük (MUF) ve melamin üre formaldehit organokil nanokompozitlerinin (MUFKNK) mineralojik yapılarının karakterizasyonu	84
Melamin formaldehit köpük (MF), melamin üre formaldehit köpük (MUF) ve melamin üre formaldehit organokil nanokompozitlerinin (MUFKNK1-3) ısı yalıtım özellikleri.....	85
Melamin formaldehit köpük (MF), melamin üre formaldehit köpük (MUF) ve melamin üre formaldehit organokil nanokompozitlerinin (MUFKNK1-3) basınç dayanımları.....	86
Melamin Formaldehit Köpük (MF), Melamin Anilin Formaldehit Köpük (MAF) ve Melamin Anilin Formaldehit Organokil Nanokompozitlerine (MAFKNK) Ait Bulgular	88

Melamin formaldehit köpük (MF), melamin anilin formaldehit köpük (MAF) ve melamin anilin formaldehit organokil nanokompozitlerinin (MAFKNK) dokusal karakterizasyonu	88
Melamin formaldehit köpük (MF), melamin anilin formaldehit köpük (MAF) ve melamin anilin formaldehit organokil nanokompozitlerinin (MAFKNK) FT-IR analizi	92
Melamin formaldehit köpük (MF), melamin anilin formaldehit köpük (MAF) ve melamin anilin formaldehit organokil nanokompozitlerinin (MAFKNK) mineralojik yapılarının karakterizasyonu	93
Melamin formaldehit köpük (MF), melamin anilin formaldehit köpük (MAF) ve melamin anilin formaldehit organokil nanokompozitlerinin (MAFKNK1-6) ısı yalıtım özellikleri	94
Melamin formaldehit köpük (MF), melamin anilin formaldehit köpük (MAF) ve melamin anilin formaldehit organokil nanokompozitlerinin (MAFKNK1-6) basınç dayanımları.....	96
Melamin Formaldehit Ön-Polimer (MF), MF-Organokil Nanokompozit ve Hibrit Kompozitlere Ait Bulgular.....	98
Ham montmorillonit (MMT), organo-montmorillonit (OMMT), melamin formaldehit köpük (MF), melamin formaldehit organokil nanokompozit (MFKNK) ve hibrit kompozitlerin dokusal karakterizasyonu	98
Melamin formaldehit köpük (MF), melamin formaldehit organokil nanokompoziti (MFKNK) ve hibrit kompozitlerin yüzey morfolojik karakterizasyonu.....	100
Melamin formaldehit reçinesi (MF), melamin formaldehit organokil nanokompozit (MFKNK) ve hibrit kompozitlerin FT-IR spektrumlarının analizi.....	102
Melamin formaldehit reçinesi (MF), melamin formaldehit organokil nanokompozit (MFKNK) ve hibrit kompozitlerin mineralojik yapılarının karakterizasyonu.....	104
Melamin formaldehit köpük (MF), melamin formaldehit organokil nanokompozit (MFKNK) ve çeşitli hibrit kompozitlerin ısıl iletkenlikleri	106
Hibrit kompozitlerin yoğunluklarının, eğilme dayanımlarının, elastikiyet modüllerinin ve vida tutma dayanımlarının bileşimlerine bağlılığı.....	109
SONUÇLAR.....	111
KAYNAKLAR.....	115
ÖZGEÇMİŞ.....	143

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Pomza, Kaolin ve Montmorillonitin X-Işınları Floresans Spektrometresi (XRF) Kimyasal Bileşimleri	64
Tablo 2. Hidrokarbon Malzemenin Bazı Özellikleri	64
Tablo 3. Saf Melamin Formaldehit Köpük (MF) ve MF-organokil Nanokompozit Köpüklerin (MAFKNK1-3) Örnek Kodları ve İçerikleri	65
Tablo 4. Saf Melamin Formaldehit Köpük (MF), Saf Melamin Üre Formaldehit Köpük (MUF) ve MUF-organokil Nanokompozit Köpüklerin (MUFKNK1-3) Örnek Kodları ve İçerikleri	66
Tablo 5. Saf Melamin Formaldehit Köpük (MF), Saf Melamin Anilin Formaldehit Köpük (MAF) ve MAF-organokil Nanokompozit Köpüklerin (MAFKNK1-6) Örnek Kodları ve İçerikleri	68
Tablo 6. Saf MF, MF-Organokil Nanokompozit ve MF-Organokil-Pomza, MF-Organokil-Pomza-Alçı, MF-Organokil-Pomza-Kaolin ve MF-Organokil-İçi Boş Cam Küre Hibrit Kompozitlerin Kodları ve Bileşen Oranları	69
Tablo 7. Saf Melamin Formaldehit Reçinesi ve farklı oranlarda kil içeren MF-organokil Nanokompozitlerinin Termal İletkenliklerinin Analiz Sonuçları.....	77
Tablo 8. Melamin Formaldehit Reçinesi (MF) ve Melamin Formaldehit Organokil Nanokompozitlerinin Yoğunluklarının ve Basma Dirençlerinin Bileşimlerine Göre Değişimi	77
Tablo 9. Saf Melamin Formaldehit Köpük (MF), Saf Melamin Üre Formaldehit Köpük (MUF) ve MUF-Organokil Nanokompozit Köpüklerin (MUFKNK1-3) Termal İletkenliklerinin Analiz Sonuçları	85
Tablo 10. Saf Melamin Formaldehit Köpük (MF), Saf Melamin Üre Formaldehit Köpük (MUF) ve MUF-Organokil Nanokompozit Köpükler (MUFKNK1-3) İçin Kütle Yoğunluğu Değerleri ve Mekanik Test Sonuçları	87
Tablo 11. Saf Melamin Formaldehit Köpük (MF), Saf Melamin Anilin Formaldehit Köpük (MAF) ve MAF-Organokil Nanokompozit Köpüklerin (MAFKNK1-6) Termal İletkenliklerinin Analiz Sonuçları	95
Tablo 12. Saf Melamin Formaldehit Köpük (MF), Saf Melamin Anilin Formaldehit Köpük (MAF) ve MAF-Organokil Nanokompozit Köpükler (MAFKNK1-6) İçin Kütle Yoğunluğu Değerleri ve Mekanik Test Sonuçları	97

Tablo 13. Saf Melamin Formaldehit Reçinesi, MF-organokil Nanokompoziti ve Çeşitli Hibrit Kompozitlerin Termal İletkenliklerinin Analiz Sonuçları	107
Tablo 14. Hibrit Kompozitlerin Yoğunluk, Eğilme Mukavemeti, Elastisite Modülü ve Vida Tutma Mukavemetlerinin Bileşimlerine Göre Değişimi.....	109



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2. Aşı Kopolimerlerinin genel yapısı	12
Şekil 3. Radikalik (A) ve iyonik (B) katılma polimerizasyonu.....	15
Şekil 4. Melamin formaldehit köpüğünün oluşum mekanizması.....	18
Şekil 5. Melaminin molekül yapısı	18
Şekil 6. Formaldahitin molekül yapısı	19
Şekil 7. Ürenin molekül yapısı	20
Şekil 8. (a) Anilinin sentezi ve (b) anilinin molekül yapısı	21
Şekil 9. Melamin ve formaldehitin kondenzasyon reaksiyonu	22
Şekil 13. Kil minerallerinin sınıflandırılması.....	26
Şekil 14. Farklı kil mineralleri	31
Şekil 15. Kil minerallerinde katyon değişiminin gösterimi	34
Şekil 19. İn-situ polimerizasyon yönteminin şematik gösterimi	43
Şekil 20. Çözeltide harmanlama yönteminin şematik gösterimi.....	44
Şekil 21. Eriyik harmanlama yönteminin şematik gösterimi	45
Şekil 22. Kil örneğinin XRD difraktogramı.....	63
Şekil 23. Ham montmorillonit (MMT) (a), Organo-montmorillonit (OMMT) (b)'nin HRTEM görüntüleri.....	72
Şekil 24. Melamin formaldehit (MF) köpük (a) ve değişen organokil oranları içeren melamin formaldehit-organokil köpüklere (MFKNK1-3 (b-d)) ait HR-TEM görüntüleri.....	73
Şekil 25. Saf melamin formaldehit reçinesi (MF) (a), farklı kil oranları içeren MF-organokil nano-kompozitlerin (MFKNK1-3) (b-d) SEM desenleri.	74
Şekil 26. Saf melamin formaldehit köpük ve farklı kil oranları içeren MF-organokil nanokompozitlerinin (MFKNK1-3) FT-IR spektrumları.....	75
Şekil 27. Saf melamin formaldehit köpüğü ve farklı kil oranları içeren MF-organokil nanokompozitlerinin (MFKNK1-3) XRD difraktogramları.	76
Şekil 28. Ham montmorillonit (MMT) (a), organo-montmorillonit (OMMT) (b), melamin formaldehit köpük (MF) (c) ve melamin üre formaldehit köpük (MUF) (d)'nin HRTEM görüntüleri.....	78

Şekil 29. Melamin Üre Formaldehit Organokil Nanokompozitleri MUFKNK1 (a1 (500nm) ve a2 (200nm)), MUFKNK2 (b1 (500nm) ve b2 (200nm)) ve MUFKNK3 (c1 (500nm) ve c2 (200nm))’nin farklı büyütmelerde HRTEM Görüntüleri	79
Şekil 30. Melamin Formaldehit Köpük (MF, a1 (200nm), a2 (1µm) ve a3 (10µm)), Melamin Üre Formaldehit Köpük, (MUF, b1 (200nm), b2 (1µm) ve b3 (10µm)) ve Melamin Üre Formaldehit Organokil Nanokompozitleri, (MUFKNK1, c1 (200nm), c2 (1µm) ve c3 (10µm)), (MUFKNK2, d1 (200nm), d2 (1µm) ve d3 (10µm)) ve (MUFKNK3, e1) (200nm), e2 (1µm) ve e3 (10µm)) Farklı Büyütmelerde SEM Desenleri	81
Şekil 30. Melamin Formaldehit Köpük (MF, a1 (200nm), a2 (1µm) ve a3 (10µm)), Melamin Üre Formaldehit Köpük, (MUF, b1 (200nm), b2 (1µm) ve b3 (10µm)) ve Melamin Üre Formaldehit Organokil Nanokompozitleri, (MUFKNK1, c1 (200nm), c2 (1µm) ve c3 (10µm)), (MUFKNK2, d1 (200nm), d2 (1µm) ve d3 (10µm)) ve (MUFKNK3, e1) (200nm), e2 (1µm) ve e3 (10µm)) Farklı Büyütmelerde SEM Desenleri (devamı)	82
Şekil 31. Melamin Formaldehit Köpüğü (MF), Melamin Üre Formaldehit Köpüğü, (MUF), Melamin Formaldehit Organokil Nanokompozitleri, MUFKNK1, MUFKNK2 ve ve MUFKNK3’ün FT-IR spektrumları	83
Şekil 32. Melamin Formaldehit Köpüğü (MF), Melamin Üre Formaldehit Köpüğü, (MUF), Melamin Formaldehit Organo Kil Nanokompozitleri, MUFKNK1, MUFKNK2 ve ve MUFKNK3’ün XRD Difraktogramları	84
Şekil 34. Melamin Formaldehit Köpük (MF), Melamin Anilin Formaldehit Köpük (MAF) ve Melamin Anilin Formaldehit Organokil Nanokompozitlerinin (MAFKNK1-6) SEM Desenleri	91
Şekil 35. Melamin Formaldehit Köpüğü (MF), Melamin Anilin Formaldehit Köpüğü (MAF) ve Melamin Anilin Formaldehit Organokil Nanokompozitlerinin (MAFKNK1-6) FT-IR spektrumları	92
Şekil 36. Melamin Formaldehit Köpüğü (MF), Melamin Anilin Formaldehit Köpüğü (MAF), Melamin Anilin Formaldehit Organokil Nanokompozitlerinin (MAFKNK1-6) XRD Difraktogramları	93
Şekil 37. Ham montmorillonit (MMT) (a) ve organomontmorillonit (OMMT) (b)’nin HRTEM görüntüleri	98
Şekil 38. Saf melamin formaldehit reçinesi (MF) (a), MF-organokil (MFKNK) (b), MF-organokil-pomza (MFKPHK) (c), MF-organokil-pomza-alçı (MFKPAHK) (d),	

MF-organokil-pomza-kaolin (MFKPKHK) (e) ve MF-organokil-pomza-içi boş cam küre (MFKPCHK) (f) hibrit kompozitlerinin HRTEM görüntüleri	99
Şekil 39. Saf melamin formaldehit reçinesi (MF) (a), MF-organokil nano-kompoziti (MFKNK) (b), MF-organokil-pomza (MFKPHK) (c), MF-organokil-pomza-alçı (MFKPAHK) (d), MF-organokil-pomza-kaolin (MFKPKHK) (e) ve MF-organokil-pomza-içi boş cam küre (MFKPCHK) (f) hibrit kompozitlerin SEM desenleri	101
Şekil 40. Saf melamin formaldehit reçinesi, MF-organokil nanokompoziti ve çeşitli hibrit kompozitlerin FT-IR spektrumları.	103
Şekil 41. Saf melamin formaldehit reçinesi, MF-organokil nanokompozit ve çeşitli hibrit kompozitlerin XRD difraktogramları.....	105



KISALMALAR DİZİNİ

A	Anilin
ABS	Akrilonitril-Bütadien-Stiren
AIBN	Azobisizobütironitril
ASTM	American Society for Testing and Materials International (Uluslararası Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu)
ATAC	2-akriloloksi etil trimetil amonyum klorür
BET	Brunauer-Emmett-Teller
°C	Santigrat Derece
CEC	Katyon değişim kapasitesi
CTA ⁺	Setil trimetil amonyum iyonu
CTAB	Setiltrimetil Amonyum Bromür
CV	Döngüsel voltametri
DSC	Diferansiyel taramalı kalorimetre
F	Formaldehit
FT-IR	Fourier dönüşümlü infrared spektroskopisi
HRTEM	Yüksek çözünürlüklü geçirimli elektron mikroskobu
IFR	Alev geciktirici
KAS	Kissinger Akahira-Sunose (KAS) yöntemi
KDK	Katyon değişim kapasitesi
M	Melamin
MAF	Melamin Anilin Formaldehit Köpük
MAFKNK	Melamin Anilin Formaldehit Organokil Nanokompozit
MF	Melamin formaldehit köpük
MFFA	Melamin formaldehit-furfuril alkol
MFKNK	Melamin formaldehit organo-kil nanokompozit
MFKPAHK	Melamin formaldehit-organokil-pomza-alçı-hibrit kompozit
MFKPCHK	Melamin formaldehit-organokil-pomza-cam küre-hibrit kompozit
MFKPHK	Melamin formaldehit-organokil-pomza-hibrit kompozit
MFKPKHK	Melamin formaldehit-organokil-pomza-kaolin-hibrit kompozit
MMT	Ham montmorillonit
MUF	Melamin üre formaldehit köpük
MUFKNK	Melamin Üre Formaldehit Organokil Nanokompozit
NMA	n-metilol akrilamid

O	Oktahedral
OMMT	Organo Montmorillonit
PANI	Polianilinin
PCM	Faz değiştiren malzeme
PDMS	Polidimetilsiloksan
PE	Polietilen
PEG	Polietilen glikol
PET	polietilen tetraflat
PETP	Polietilen tereftalat
PF	fenol formaldehit
PMMA	polimetilmetakrilat
PP	Polipropilen
PS	Polistiren
PTL	Polimer Teknolojisi Laboratuvarı
PU	Poliüretan
PVA	Polivinil alkol
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SMF	Süperhidrofobik melamin formaldehit köpüğü
SYA	Spesifik yüzey alanı
T	Tetrahedral
TEM	Geçirimli elektron mikroskobu
TGA	Termal gravimetrik analiz
UF	Üre formaldehit
UV	Ultraviyole
VSM	Titreşimli numune manyetometresi
XPS	X-ışını fotoelektron spektroskopisi
XRD	X ışını difraksiyonu
XRF	X-Işınları Floresans Spektrometresi
μm	Mikrometre
λ	Isı İletim Katsayısı

GİRİŞ

İnşaat, havacılık, otomotiv, elektrik ve ısı yalıtımı, paketleme gibi geniş uygulama alanlarına sahip heterojen malzemeler olan kompozitler, ana matrislerine göre metal, seramik ve polimer matris olmak üzere üç ana sınıfa ayrılmaktadır (Ambli *et al.* 2019; Chen *et al.* 2020; Wang and Aslani 2019; Nayak *et al.* 2020; Suresha *et al.* 2021). Polimer matris ise termoplastik ve termoset olarak alt bölümlere ayrılmıştır. Fenolik, epoksi, polyester, poliimid ve poliüretan gibi termoset polimerlerin termoplastiklere göre imalat kolaylığı, daha hızlı kürlenme, alev geciktirme ve ısınmaya karşı yapısal bütünlüğü koruma gibi bazı avantajları olduğu gibi, ısıya dayanıklı hale getirilememesi gibi dezavantajları da bulunmaktadır. (Arikan 2017; Turcsan and Meszaros 2017; Yashas *et al.* 2018; Dogan and Mazumdar 2001; Ramakrishnan *et al.* 2022). Isıyla sertleşen kırılğan reçinelerin özelliklerini geliştirmek için matrise birçok takviye eklenebilir ve bunlar uzun ve kısa lifler, parçacıklar ve pullar şeklinde olabilir. Parçacıklar katmanlı, küresel, boru şekli olmak üzere çeşitli geometrilere sahip olabilir ve rastgele şekillendirilmiş, parçacık boyutları birkaç nanometreden 100 µm'a kadar değişmektedir (Sonnenfeld *et al.* 2017; Liu and Macosko 2019; Alsaadi and Erklığ 2019; Qin *et al.* 2019; Toorchi *et al.* 2022). Ayrıca termosetler çok düşük kür büzülmesine, yüksek boyutsal kararlılığa, yüksek çekme mukavemetine ve yüksek yapışma özelliklerine sahiptirler (Turcsan and Meszaros 2017). Ancak termoset polimerlerin sünekliğini arttırmak için küresel kauçuk parçacıkları, sıvı kauçuklar, cam boncuklar ve dallanmış polimerler gibi birçok sertleştirici madde sıklıkla kullanılmaktadır (Kargarzadeh *et al.* 2017; Rudresh *et al.* 2019; Hsieh *et al.* 2021; Kutuzova and Kandelbauer 2022). Polimerlerin mekanik performanslarını iyileştirmek için harmanlama, kopolimerizasyon, takviye edici dolgu maddeleri ve elyafların eklenmesi gibi işlemler gerçekleştirilmektedir. Polimer modifikasyonu ve dolgu maddeleri ile liflerin eklenmesi için en etkili yöntem polimer harmanlamadır (Agag *et al.* 2010; Islam and Bhat 2021). Termoset formaldehit reçinelerinin yüksek çapraz bağlanma yoğunluğu, kırılğan bir yapıya ve düşük tokluğa neden olur, dolayısıyla bu durum uygulamalarını sınırlar. Bu nedenle formaldehit reçinelerinin dayanımını, mekanik ve termal stabilite gibi özelliklerini geliştirmek amacıyla farklı tip ve miktarlarda nano dolguların kullanımı üzerine birçok çalışma yapılmaktadır (Morreale *et al.* 2015; Luo *et al.* 2019; Hsissou *et al.* 2021; Osman *et al.* 2021).

Polimer matrisinde homojen olarak dağılmış nanokümelerin oluşması ve kırılması, nanokompozitlerin hazırlanmasında karşılaşılan temel zorluklardır ve bu nedenle parçacıkların polimer matris içinde heterojen olarak toplanıp dispersiyon dağılma eğilimini azaltmak ve

etkin bir şekilde kullanılması sağlamak için yoğun araştırmalar yapılmaktadır (Sun *et al.* 2015; Kumar *et al.* 2018). Nanopartiküllerin polimer matrisindeki küme boyutu ve dağılımı ve dolgu maddesi ile moleküler zincirler arasındaki arayüzey etkileşimlerinin etkinliği, saf polimerin temel özelliklerinin değiştirilmesinde belirleyicidir (Radoman *et al.* 2014; Fu *et al.* 2019; Sattar 2021). Nanoteknolojik uygulamalarla daha iyi özelliklere sahip yeni yapıştırıcı türleri dünya çapındaki kompozit endüstrisi için yeni ve büyük bir fırsat yaratmıştır. Melamin formaldehit reçinelerinin nanomateryal ile güçlendirilmiş nanoteknolojik uygulamalara dahil edilmesi, birçok endüstriyel alanda kullanım potansiyeli olan yeni ve oldukça etkili kompozitlerin hazırlanmasına olanak sağlamıştır (Jasmani *et al.* 2020; Omran *et al.* 2021; Pour *et al.* 2021; Pour *et al.* 2021; Dorieh *et al.* 2022).

Karbon nanolifleri, nano-selüloz, nanokil, nano-SiO₂, nano-TiO₂, ZnO ve Al₂O₃ gibi nano dolgular melamin formaldehit reçinesinin mekanik özelliklerini, elektriksel ve termal iletkenliğini, ısı yalıtımını ve yangın geciktirici özelliklerini geliştirmek için kullanılmaktadır (Gindl and Jeronimidis 2004; Mousavi *et al.* 2018; Dorieh *et al.* 2022; Gürses and Şahin 2023). Genel olarak kompozitlerin mekanik ve viskoelastik özelliklerini geliştirebilen nanopartiküller, aynı zamanda yüksek yüzey alanları ve etkili yapışma etkileşimleri nedeniyle topaklanma eğilimi de gösterebilmektedir (Móczó and Pukanszky 2008; Rouhani and Ramazani 2018; Idumah and Obele 2021). Bu nedenle matris ile nanopartiküller arasında etkili bir etkileşimin sağlanması ve yüksek yüzey alanlarından maksimum faydanın sağlanması için nanopartiküllerin reçine içindeki dağılımının ve homojenliğinin kontrol edilmesi son derece önemlidir (Saba *et al.* 2014; Rajeshkumar *et al.* 2021). Özellikle nanopartiküllerin polimerik matris içerisinde düzgün dağılımı, tokluğun ve mekanik mukavemetin artırılması açısından büyük önem taşımaktadır (Bittmann *et al.* 2009; Naskar *et al.* 2016). Nispeten düşük maliyet ve bulunabilirlik nedeniyle, modifiye edilmiş killerin nano dolgu maddesi olarak kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Yüksek en/boy oranına bağlı olarak nanokompozit yapıdaki mükemmel parçacık-parçacık ve parçacık-yüzey etkileşimi nedeniyle nano kil, polimerlerin termal bozunma direncini, bariyer özelliklerini ve mekanik mukavemetini geliştirebilmektedir (Zhao *et al.* 1999; Pavlidou and Papaspyrides 2008; Pol *et al.* 2015; Pol *et al.* 2017; Guo *et al.* 2018; Annappa *et al.* 2022; Das *et al.* 2021; Das *et al.* 2022). Çözelti interkalasyonu, eriyik interkalasyonu, yerinde polimerizasyon (Becker *et al.* 1996; Yasmin *et al.* 2006) ve ultrasonik ışınlama (Xia *et al.* 2003; Wang *et al.* 2005; Kumar *et al.* 2016) kompozit hazırlamada en sık kullanılan tekniklerdir. Nispeten ucuz ve çeşitli nanopartiküller arasında bol miktarda bulunan montmorillonitin yüzey modifikasyonu ile hazırlanan organo-montmorillonit, polimerik kompozitlerde nanodolgu maddesi olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır (Vijayan *et al.* 2015; Wang *et al.* 2015; Nguyen *et al.* 2017; Nguyen *et al.* 2018; Buruga *et al.* 2019).

Montmorillonitin yüzey modifikasyonu çoğunlukla kuaterner amonyum tuzları kullanılarak iyon değişimi ile gerçekleştirilir. Organo-montmorillonit (OMMT) takviyesi, polimerin termal stabilitesini, su direncini, bariyer özelliklerini ve mekanik mukavemetini geliştirebilir. Bunun nedeni, polimer zincirlerinin ara katman boşluğuna eklenmesi, taktoidlerin oluşumu ve hatta uygun polimer kompozit hazırlama koşulları altında organo-montmorillonitin pul pul dökülmesidir (Baysal *et al.* 2018; Shah *et al.* Albozahid *et al.* 2022). Triazin halka yapısına sahip, nitrojen açısından zengin ve stabil melamin formaldehit reçinesi, termal stabilite, yangın geciktiricilik, düşük ısı iletkenliği, düşük emisyon ve şeffaflık gibi üstün özelliklere sahip olup, su geçirmez ve erime noktası yükselir. Üre-formaldehit ve epoksi bazlı nanokompozitler bilimsel ve endüstriyel araştırmalarda sıklıkla çalışılırken, Melamin formaldehit köpüğü üzerine yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır (Rouhani and Ramazani 2018). Bu nedenle sunulan çalışma köpükte hibrit kompozitlerin hazırlanmasına odaklanmaktadır. Matris olarak organokil melamin formaldehit nanokompoziti, birincil dolgu maddesi olarak pomza ve ikincil dolgu maddesi olarak alçı, kaolin ve içi boş cam küre kullanılarak yeni bir yaklaşımla form oluşturulmakta ve bunların morfolojik ve dokusal özellikleri incelenmektedir. Bu amaçla hazırlanan kompozitler üzerinde eğilme mukavemeti, elastisite modülü, vida tutma direnci ve ısı iletkenlik ölçümleri gibi bazı testler yapılmış ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Literatürde MUF (Melamin-üre-formaldehit) nano kompozit köpük sentezi ile ilgili sınırlı sayıda çalışma mevcut olup, MUF köpüğün mekanik, termal ve bariyer özelliklerinin kil takviyesi ile iyileştirilmesine yönelik herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle, bu çalışma, yüksek reaksiyon hızı, verimlilik ve kısa kürleme süresi gibi avantajlar sunabilen, ısıl işleme birleştirilmiş mikrodalga ısınlama tekniği kullanılarak melamin üre formaldehit organokil nanokompozit köpüklerinin hazırlanması ve karakterizasyonuna odaklanmıştır. Ayrıca hazırlanan kompozitlerin hem ısı yalıtım hem de basınç dayanımı değerlerinin organo kil oranının artışıyla ilgili olarak nasıl değiştiği de incelenmiştir.

KURAMSAL TEMELLER

Nanoteknolojinin Tanımı ve Kullanım Alanları

Nanoteknoloji alanı son yıllarda giderek daha popüler hale gelmektedir. Nanoteknoloji, en az bir karakteristik boyutu nanometre cinsinden ölçülen işlevsel yapıların tasarımını, yapımını ve kullanımını ifade etmek için kullanılır (Kelsall 2005; Ramsden 2016). Yunanca nano kelimesi cüce anlamına gelir. Bilimde nano milyarda bir anlamına gelir ve 10^{-9} faktörünü ifade eder. İnsan beyni için bu kadar küçük bir sayıyı hayal etmek zor olduğundan, nanoölçeğini kavrayacak analogiler bulunmuştur. Örneğin metrenin (m) nanometreye (nm) oranı (m/nm) yaklaşık olarak Dünya gezegeninin çapı ile fındığın çapının oranına eşittir. Bir nanometre yaklaşık olarak bir tırnağın bir saniyede uzadığı uzunluktur. Nanoteknolojinin tanımı; 1-100 nanometre (nm) boyutundaki maddenin atomik ve moleküler düzeyde yönlendirilmesi ve yeniden yapılandırılmasıyla farklı özellikler ve nitelikler kazandırılması şeklinde yapılmaktadır. Amaç, temelde farklı özelliklere ve işlevlere sahip malzeme, cihaz veya sistemler tasarlamaktır (Roco 2011). Nanopartiküller, nanoteknolojinin temelini oluşturur. Nanopartiküller, boyutları 100 nm'den küçük olan inanılmaz derecede küçük parçacıklardır ve karbon, metal, metal oksitler veya organik maddeler içerebilir (Hasan 2015). Nanoteknolojik çalışmaların en önemli özelliklerinden biri, nano boyutta bir malzeme veya sistemin temel fiziksel ve kimyasal özelliklerinin (örneğin; erime sıcaklığı, termal iletkenlik, şarj kapasitesi, elektronik iletkenlik, gerilme mukavemeti ve renk) istenilen şekilde tasarlanabilmesi ve çok farklı alanlar için kullanılabilmesidir (Dahman 2017). Nanopartiküller metal, seramik, polimer veya kompozit sistemlerin işlevselliklerinde iyileştirmeler sağlayarak nano boyutlu malzemelerin yanında nanoteknolojinin de temelini oluşturmakta ve günlük hayatta birçok ürünün geliştirilmesinde ve üretiminde kullanılmaktadır (Yakar 2018). Şekil 1'de nanoteknolojinin kullanım alanları verilmiştir.



Şekil 1. Nanoteknolojinin kullanım alanları

Nanopartikülleri diğer malzemelerden ayıran özellikleri yüzey alanı genişliği ve kuantum etkileridir. 30 nm boyutunda bir parçacık için yüzeydeki atomların oranı %5 iken, 10 nm boyutundaki bir parçacık için bu oran %20'ye kadar çıkabilmektedir. Buradan hareketle nanopartiküllerin büyük partiküllere göre daha yüksek yüzey/hacim oranına sahip olduğu sonucu çıkarılabilmektedir. Bu özellikleri sayesinde nanopartiküller; reaktivite, direnç, sertlik ve elektriksel özellikleri açısından daha hassas hale getirilmektedir (Yakar 2018). Nanopartiküllerin daha büyük boyutlara sahip benzerleri ile kıyaslandığında farklı fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklere sahip olduğu görülmektedir. Nano boyut, artan kimyasal reaktivite, stabilite veya hacme göre daha geniş bir yüzey alanı, daha fazla mekanik mukavemet gibi etkilere katkıda bulunur. Spesifik özelliklerinden dolayı nanopartiküllerin çeşitli kullanım alanları vardır (Yang *et al.* 2021). Nanopartiküller kaplama, yüzeyler ve fonksiyonel yapılar için uygun olduğundan yaygın olarak kullanılmaktadır. Kendi kendini temizleyebilen yüzeyler ve camlar buna en iyi örnektir. Yüksek aktivasyonlu titanyum dioksit kullanarak kaplanan malzemeler suyu tutmaz ve anti bakteriyel özelliklere sahiptir. Dokunmaya duyarlı, oda sıcaklığında kendi kendini toparlayabilen nikel nanopartiküller kullanılarak üretilen sentetik polimer kompozitler de başka bir örnektir. Virüs, bakteri ve mantarlara karşı oldukça etkili olan iyonik nano gümüş içeren bir çözelti geliştirmiş, bu çözelti yüzeyde bir film tabakası oluşturarak zararlı organizmaların tutunmasını engellerken, daha uzun süre kullanılabilen ve %99 koruyucu oranına sahip cerrahi maskelerin üretiminde kullanılabilmektedir (Aras 2021).

Polimer

Polimer Latince bir sözcük olup “çoklu parça” anlamına gelmektedir. Çok sayıda küçük molekülün biraraya gelerek kimyasal bağlarla bağlanarak oldukça düzenli bir şekilde oluşturulan yüksek molekül kütleli bileşikler olarak bilinmektedirler. Polimerler "monomer" adı verilen ard arda gelerek birbirinin tekrarı şeklinde olan uzun zincirli moleküllerdir (Desidery and Lanotte 2022). Polimerler, en azından kısmen organik, genellikle petrol bazlı ham maddelerden türetilen geniş bir malzeme yelpazesini oluşturur; tekrarlanan moleküler birimlerden oluşurlar ve moleküler yapıların biçiminin mühendisliğiyle elde edilen farklı özelliklere sahiptirler (Ciardelli *et al.* 2019; George *et al.* 2020). Polimer terimi, nispeten sınırlı sayıda monomer biriminden sentezlenebilen sonsuz sayıda bileşiği uygun bir şekilde tanımlar (Fakirov 2017; Lodge and Hiemenz 2020). Plastik terimi de genellikle polimerlerin tanımlanmasında kullanılır ancak, bu terim, birçok polimerin reolojisini ifade eden genel bir tanımlama olduğundan ve bu malzeme grubunu doğru bir şekilde tanımlamak için fazla genel olduğundan bilimsel bir kullanım değildir.

Polimerler saf formda, yani saf malzeme olarak veya hem organik hem de inorganik çok çeşitli katkı maddeleri ile kombinasyon halinde mühendislik malzemesi olarak kullanılır. Bu katkı maddeleri diğerlerinin yanı sıra, malzemenin sertliğini veya kırılabilirliğini azaltan plastikleştiriciler, yük altında mukavemeti ve akma davranışını artıran dolgu maddeleri veya polimeri ultraviyole radyasyona karşı koruyan stabilizatörler olabilir.

Polimer tipleri

Polimerlerin ısı altındaki davranışları ile termoplastik, termoset ve elastomer olmak üzere üç farklı tipi bulunmaktadır.

Termoplastikler

Plastik malzeme olarak bilinirler. Termoplastik polimerler ısıtıldığında yumuşar ve yeniden şekillendirilebilir, yeni şekil soğuduğunda korunur. İşlem, polimer yapısının minimum düzeyde bozulmasıyla dönüşümlü ısıtma ve soğutma yoluyla birçok kez tekrarlanabilir (Li and Shojaei 2012).

Son yıllarda plastik üretiminin önemli ölçüde artması, dünya çapında atık toplama alanlarında ve doğal yaşam alanlarında atık olarak biriken ve sürekli büyümeye bağlı yönetim yöntemleriyle ömrünü tamamlamış plastiklerin çevreye atılması konusunda tüm dünyada büyük bir soruna yol açmaktadır. Son yıllarda atık plastik sorunu, çeşitli yöntemlerle (mekanik geri dönüşüm veya kimyasal geri dönüşüm gibi) çözülmeye çalışılarak, ürünlerin belirlenen koşullarda kullanıma hazır hale getirilmesi, en ekonomik, ekolojik ve akılcı şekilde sağlanmaya çalışılmaktadır (Kolek 2001; Hopewell *et al.* 2009; Rodriguez *et al.* 2014; Jiun *et al.* 2016).

Akrilikler (Polimetilmetakrilat, PMMA)

Bunlar optik netlikleriyle dikkat çeker ve perspeks ve pleksiglas olarak levha, çubuk, boru vb. olarak mevcuttur. Sert ve kırılmandır, renk solmasına ve özellikle hava koşullarına karşı oldukça dayanıklıdır. Uygulamalar arasında dış mekân sergileme tabelaları, optik lensler ve prizmalar, şeffaf kaplamalar, çizim aletleri, reflektörler, kontrol düğmeleri, banyolar ve lavabolar yer alır. Çok çeşitli şeffaf ve opak renklerde mevcuttur (Lin, 2020).

Akrilonitril-Bütadien-Stiren (ABS)

Üç monomerin bu kombinasyonu, kayda değer darbe direnci özellikleri ve işlenme kolaylığı ile güçlü, sert ve aşınmaya dayanıklı bir malzeme oluşmasını sağlar. Birçok uygulama arasında borular, buzdolabı kaplamaları, araba enstrüman çevreleri, radyatör ızgaraları,

telefonlar, tekne iskeletleri ve radyo ve televizyon parçaları yer alır. Darbe dirençleri orta, yüksek ve çok yüksek olarak gruplandırılabilir (Olivera *et al.* 2016).

Polietilen tereftalat

Polietilen tereftalat (PETP) ve değiştirilmiş versiyonları, yüksek mukavemete, sertliğe, kimyasal ve aşınma direncine, yönlendirilmiş formda darbe direncine ve düşük sürtünme katsayısına sahiptir. Rulmanlar, lastik takviyesi, şişeler, otomotiv parçaları, dişliler ve kamlar için kullanılır (Ji, 2013).

Poliamidler (Naylonlar)

Poliamidler, yüksek titreşim sönümleme kapasitesi, aşınma direnci, doğal kayganlığı ve yüksek hızlı rulmanlar için yüksek yük kapasitesi ile en zorlu mühendislik plastikleri arasında yer alan Naylon 6, Naylon 66 ve Naylon 10 gibi ticari örnekleri olan bir termoplastik grubudur. Düşük sürtünme katsayısına ve yüksek esnekliğe sahiptirler (Chapman and Chruma 2020; Al-Shawabkeh 2023). Pigmentle stabilize edilmiş türleri ultraviyole radyasyondan etkilenmez ve kimyasal direnci iyidir. Naylon, nem emilimi nedeniyle şişmeye eğilimlidir. Naylon yataklar toz haline getirilmiş molibden disülfid veya grafit ile doldurulabilir. Uygulamalar arasında rulmanlar, elektrik izolatörleri, dişliler, tekerlekler, vidalı bağlantı elemanları, kamlar, mandallar, yakıt hatları ve döner contalar yer alır.

Polietilen

Düşük yoğunluklu polietilen (orijinal olarak polietilen olarak adlandırılır) filmler, kaplamalar, borular, kablo kaplamaları ve elektrik yalıtımı için kullanılır. Yüksek yoğunluklu polietilen daha büyük kalıplar için kullanılır ve levha, tüp vb. şeklinde mevcuttur. Polietilen, düşük mukavemeti ve sertliği nedeniyle mühendislik malzemesi olarak kullanımı sınırlıdır. Birçok oksitleyici kimyasal madde ve bazı hidrokarbon çözücülere karşı direnci zayıftır (Jokar *et al.* 2012).

Bunların dışında polifenilen oksit, polifenilen sülfür, polipropilen, polikarbonat, polivinil klorür, polisülfon, polistiren ve polietersülfon da termoplastiklere örnektir.

Termosetler

Kompozitler, kaplamalar ve yapıştırıcılar için yaygın olarak kullanılan ısıyla sertleşen bu polimer grubu, toplam plastik tüketiminin kabaca %15-20'sini oluşturur. Termosetler tipik olarak ortalama işlevselliği ikiden fazla olan çok işlevli monomerlerin ve oligomerlerin polimerleştirilmesi (sertleştirilmesi) veya önceden oluşturulmuş doğrusal veya dallanmış

polimerler arasında kimyasal çapraz bağlantılar oluşturarak meydana gelmektedirler. Termosetler geniş bir polimer sınıfıdır ve kürlendikten sonra son ürün tekrar kullanılamaz (Thakur and Thakur, 2014; Utekar *et al.* 2021; Susan *et al.* 2022). Bu geri dönüşü olmayan kimyasal reaksiyonlar, bir kez oluştuktan sonra termal olarak tekrar işlenemeyen, birbirine bağlı moleküllerden oluşan çapraz bağlı bir ağ oluşturur. Avantajları arasında doğrusal termoplastiklere kıyasla ısıyla yumuşamaya, sürtünmeye ve solventlere karşı yüksek direnç yer alır (Biron 2004; Quirino *et al.* 2021). Epoksiler, poliüretanlar, fenol-formaldehit reçinesi, doymamış polyester, polibenzoksazin, üre-formaldehit vb. bu sınıfa aittir. Havacılık, otomotiv ve inşaat endüstrilerindeki yüksek performanslı uygulamalar için oldukça dayanıklı polimerlerdir. Geleneksel olarak, ısıyla sertleşen polimerler, yenilenemeyen petrol kaynaklarından türetilen monomerlerden hazırlanır. (Ramon *et al.* 2018). Termosetler genellikle termoplastiklerden daha dayanıklı ve daha serttir.

Alkidler

Bunlar yüksek boyutsal stabiliteye ve ısı direncine, mükemmel elektriksel özelliklere, yağlara, katı yağlara ve çoğu çözücüye karşı yüksek dirence sahiptir, ancak kuvvetli asitlere ve alkalilere karşı sınırlı dirence sahiptir. Cam veya minerallerle katkılanarak mekanik özellikleri iyileştirilir. Temel kullanım alanları içerisinde elektrikli bileşenler ve kapsülasyon bulunmaktadır. Geniş bir renk yelpazesyle hızlı sertleşen türleri bulunmaktadır (Ifijen *et al.* 2022).

Amino reçineler

Bunlar üre veya melamin ile reaksiyona giren formaldehit esaslıdır ve laminatlar, emprenye edilmiş kâğıt tekstiller ve kalıplama tozları için kaplamalar ve yapıştırıcılar olarak formüle edilir. Reçineler genellikle selüloz, odun talaşı ve/veya diğer dolgu maddeleri ile birleştirilir. Açık dokuma kumaşlı kompozitler olarak panel yapımında kullanılırlar. Kullanım alanları aynı zamanda elektrikli ev aletleri ve elektrikli aydınlatma armatürlerini de içerir; melamin türü sofra takımlarında kullanılır. Mukavemet, gerilimli bileşenlerde kullanım için yeterince yüksektir, ancak malzeme kırılgandır. Elektriksel ve termal özellikleri oldukça iyidir (Pizzi and Ibeh, 2022).

Epoksiler

Epoksi reçineler endüstride mühendislik polimerleri ve yapıştırıcılar olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır (Mohan, 2013). Bir “sertleştirici” kullanılarak basınçsız ve soğuk olarak kürlenebilirler veya ısıyla kürlenebilirler. İnert dolgu maddeleri, plastikleştiriciler, esnekleştiriciler ve genişleticiler, yumuşak esnekten sert katı malzemelere kadar geniş bir

yelpazede özellikler sağlar. Ahşap, metal, cam gibi hemen hemen tüm malzemelere yapışması mükemmel olup mekanik, elektriksel ve kimyasal özellikleri de oldukça iyidir. Epoksiler, büyük dökümler, elektrikli parçalar, devre kartları, çömlekçilik, cam ve karbon fiber yapılar, döşeme, koruyucu kaplamalar ve yapıştırıcılar dahil olmak üzere mühendisliğin tüm dallarında kullanılmaktadır. Daha da önemlisi kürlenme sırasında çok az büzülme gösterirler (Rudawska, 2017).

Fenolikler (fenol formaldehit, PF)

Bakalit olarak da bilinen fenol formaldehit (PF), kalıplanmış gerilmemiş veya hafif gerilmeli parçalar için genellikle %50 ila %70 odun talaşı ile katkılanır. Diğer dolgu maddeleri, elektrikli parçalar için mika, ısı direnci için asbest, mukavemet ve elektriksel özellikler için cam elyafı, naylon ve grafitir. Fenolikler düşük sürtünme uygulamaları için en iyi polimerlerden birini temsil ederler ve yüksek dayanıklılığa, parlaklığa ve iyi bir sıcaklık dayanım aralığına (150°C- 220°C) sahiptir, ancak oldukça kırılıgandır. Uygulamaları arasında, elektrik devre kartı, dişliler, kamlar ve araba fren balataları (asbest, cam, metal tozu vb. ile katkılandığında) bulunur. Maliyeti düşük ve basınç dayanımı çok yüksektir (Hirano and Asami, 2013; Koizumi *et al.* 2010).

Polyester

Polyester reçineler oda sıcaklığında bir sertleştiriciyle veya tek başına 70 ila 150°C’de kürlenebilir. Kaplama, kapsülleme, astarlama, diş kilitleme, dökümler ve endüstriyel kalıplamalar için dolgusuz olarak kullanılır. Çoğunlukla cam takviyeli plastik (CTP) pervazlarda kullanılır (Silva *et al.* 2020).

Poliimidler

Poliimidler, oksidasyona ve 250°C’ye (aralıklı kullanım için 400°C) kadar çalışma sıcaklıklarına karşı alışılmadık derecede yüksek dirençleriyle dikkat çekmektedir. Düşük sürtünme katsayısı ve aşınmaya karşı yüksek direnç onları ideal kılar. Grafit veya molibden disülfid dolgusu bu özellikleri geliştirir. Yüksek yoğunluklu yalıtım bandı için kullanılırlar. Poliimidler yüksek mukavemete, düşük nem emilimine sahiptir ve güçlü alkaliler ve amonyak çözeltileri dışında çoğu kimyasala dayanıklıdır (Woo *et al.* 2011).

Silikonlar

Bunlar soğuk veya ısıyla sertleştirilebilir ve yüksek sıcaklıktaki laminatlar ve ısıya dayanıklı elektrikli parçalar için kullanılır (ısı bozulma sıcaklığı 450°C). Özel amaçlı kalıplamalarda dolgusuz ve dolgulu tipleri kullanılmaktadır. Organosilikonlar yüzey

kaplamalarında ve organik ve organik olmayan malzemeler arasında üstün bir yapıştırıcı olarak kullanılır (Ames, 1958).

Lamine polimer yapılar

Liflerle birleştirilmiş polimer reçinelerden çok çeşitli kompozit yapılar hazırlanmaktadır. Lamine polimer yapılar, levhalar, çubuklar, tüpler vb. üretmek için genellikle ısıyla sertleşen bir reçine ile emprenye edilmiş ve birbirine bağlanmış elyafı malzeme katmanlarından oluşur (Arrabiyeh *et al.* 2021).

Fenolikler

Fenolikler kâğıt, pamuklu kumaş, asbestli kâğıt kumaş veya keçe, sentetik kumaş veya odun talaşı ile takviye edilebilir. Genel amaçlı mekanik ve elektrikli parçalar için kullanılırlar. İyi mekanik ve elektriksel özelliklere sahiptirler (Jawaid and Khalil, 2011).

Epoksiler

Bunlar yüksek performanslı mekanik ve elektrik uygulamaları için kullanılır. Kullanılan dolgu maddeleri kâğıt, pamuklu kumaş ve cam elyafıdır (Satpute *et al.* 2022).

Tufnol

“Tufnol”, kâğıt ve asbest kumaş ile fenolik reçine ve cam veya kumaş ile epoksi reçine kullanan çok çeşitli levha, çubuk ve tüp malzemelerinin ticari adıdır (Idol and Lehman, 2004).

Polyester

Polyester normalde cam dolgu maddesiyle kullanılır. Mekanik ve elektriksel özellikleri epoksilerden daha düşüktür. Kendi renklerinde oluşturulabilirler (Suresha *et al.* 2009).

Melamin

Melamin için kullanılan dolgu maddeleri kâğıt, pamuklu kumaş, asbestli kâğıt kumaş ve camdır. Melaminler sert, çizilmez bir yüzeye, üstün elektriksel özelliklere sahiptir ve kendi renklerinde işlenebilmektedir. Özellikle ıslak ve kirli koşullarda yalıtkan olarak kullanılırken dekoratif ve endüstriyel laminatlarda da yaygın olarak kullanılırlar (Sandberg, 2016).

Silikon

Silikon, yüksek sıcaklık uygulamaları için (250°C; aralıklı kullanımda 300°C) asbest kâğıt, kumaş ve cam dolgu maddeleri ile birlikte kullanılır. Mükemmel elektriksel özelliklere sahipken, düşük mekanik özelliklere sahiptir (Seymour, 1976).

Poliimid

Poliimid çoğunlukla cam ile birlikte dolgu maddesi olarak kullanılır. Poliimidler, silikonlara benzer bir çalışma sıcaklığına sahip, ancak iki ila üç kat daha fazla mukavemet ve esnekliğe sahip üstün termal ve elektriksel özelliklere sahiptir (Yi *et al.* 2020).

Elastomerler

Elastomerler veya kauçuklar, bir miktar çapraz bağlanmaya sahip doğrusal zincir moleküllerine sahip, esasen amorf polimerlerdir; bu, elastikiyeti ve bir yük kaldırdığında malzemenin orijinal şekline geri dönmesini sağlar. Stres altında büyük gerilimler (tipik olarak %100) ile karakterize edilirler. Elastomer sertleştiğinde parçacıklar yerine kilitlenir ve malzemeye bir kesme kuvveti uygulandığında, elastomerdeki dipol etkileşimlerinin üstesinden gelmek için ilave işe ihtiyaç duyulur. İlave iş miktarı, manyetik alanın artmasıyla monoton bir şekilde artar, bu da alana bağlı bir kayma modülüyle sonuçlanır. Ayrıca, elastomer çok yüksek gerilimi hasar görmeden tolere edebilir. Sentetik kauçuk ve stiren bütadien en çok kullanılan elastomerdur ve doğal kauçuk da ikinci sırada yer alır (Borcea and Bruno 2001; Shen *et al.* 2004).

Doğal kauçuklar

Bu elastomerler yüksek mukavemete ve esnekliğe sahiptir, ancak yakıtlara, yağlara, aleve ve güneş ışığı yaşlanmasına karşı direnci zayıftır. Çoğunlukla bunların yerini alan sentetik kauçuklardan daha maliyetlidirler. Yumuşak kauçuk vulkanizatör olarak %1 ila %4 arasında kükürt içerir. Karbon siyahı, silisyum dioksit, kil ve odun unu gibi dolgu maddelerinin eklenmesiyle aşınma direnci artırılır. “Sert kauçuk” %25’e kadar kükürt içerebilir. Uygulamalar arasında araç lastikleri ve iç lastikleri, contalar, titreşim önleyici montaj parçaları, hortumlar ve kayışlar bulunur. %45’ lik tam vulkanizasyon sonucu ebonit üretilir (Vijayaram, 2009).

Sentetik kauçuklar

Bunlar uygulama açısından doğal kauçuklara benzer, ancak daha ucuz olmasına rağmen genellikle mekanik özellikler açısından daha zayıftır. Araba fren hidroliklerinde sistemler ve hortumlar, kayışlar, contalar ve titreşim önleyici aletler için kullanılırlar (Boon *et al.* 2022).

Yüksek performanslı polimerler

Zorlu yüksek sıcaklıktaki mühendislik ortamlarıyla başa çıkabilen polimerler, yüksek performanslı polimerler olarak adlandırılır (Das *et al.* 2020). Mevcut termoplastiklerin birçoğu yüksek sıcaklıktaki ortamlara dayanma kapasitesine sahip değildir, bu nedenle daha yeni

çalışmalar, örneğin termal olarak kararlı aromatik gruplar ve rezonansla stabilize edilmiş sistemler içeren polimer yapılara odaklanmıştır. Yüksek performanslı polimerler tokluk, sertlik, sağlamlık, yüksek sıcaklık dayanımı, düşük yanıcılık ve düşük duman emisyonu gibi ortak özellikleri gösterir. Bu polimer sınıfı otomotiv, havacılık, elektrik, elektronik ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılır.

Kopolimerler

Kopolimerler, iki veya daha fazla farklı tipte monomer içeren zincirlerden oluşur (Wall 1944; Mayo and Walling 1950). İki monomer grubu içeren en basit kopolimer durumunda bile, çok sayıda olası kopolimer tipi vardır. En yaygın olarak oluşturulan kopolimer, monomerlerin polimer zinciri boyunca rastgele düzenlendiği rastgele bir kopolimerdir. Eğer bileşen monomerler A ve B olarak gösterilirse zincir bir şekilde

-ABBAAABAABBBA- gibi görünecektir. Monomerler polimer zincirinde (-ABABABAB-) düzenli bir şekilde değiştiğinde, alternatif bir kopolimer oluşur. Blok kopolimerler, diğer monomerin başka bir uzun dizisine birleştirilmiş bir monomerin uzun dizilerini içerir. Bir aş kopolimeri, bir monomerin zincirlerinin başka bir homopolimerin ana zincirine bağlanmasıyla oluşturulur. Aş kopolimerlerinin genel yapısı aşağıdaki gibidir:

-AAAAAAAAA-BBBB-

Şekil 2. Aş Kopolimerlerinin genel yapısı

Polimerizasyon reaksiyonları

Polimer sentezi, tekrar birimleri, polimerizasyon derecesi, mikro yapı açısından spesifik özelliklere sahip makromoleküllerin üretilmesinin yanı sıra küçük nesneler (nano veya mikro parçacıklar) ve makroskopik üç boyutlu ağlar üretme sanatıdır. Bu, zincir ekleme işlemiyle veya aşamalı büyüme polimerizasyonu ile başarılabılır. Polimerizasyon reaksiyonlarının çoğu, termal aktivasyonla birleştirilmiş geleneksel başlatma veya katalize dayalı kimyasal reaksiyonlarla ilerlemesine rağmen, enzimatik veya radyasyon destekli işlemlere dayalı alternatif yöntemler, sentetik polimerlerin tarihinin erken dönemlerinde keşfedilen belirli özellikler sergiler (Oadian 2004; Ashfaq *et al.* 2020). Basit monomerlerle başlatılan zincir polimerizasyonunun keşfini bildiren ilk çalışmalar 1940 yılına kadar uzanmaktadır (Hopwood *et al.* 1939; Ivanov 1992). Polimerizasyon reaksiyonları başlangıçta W.H. Carothers tarafından 1929'da önerildiği gibi kondenzasyon ve katılma işlemleri olarak sınıflandırılmıştı. Yoğunlaşma reaksiyonları, monomerlerin küçük bir kaybın eşlik ettiği reaksiyonunu içerir. Katılma reaksiyonları böyle bir kayıp (su gibi bir molekül) olmadan monomerlerin birbirine

bağlanmasını içerir. Bununla birlikte, poliüretan üretiminde yer alan reaksiyonlar gibi bu sınıflandırmalara kolayca girmeyen polimerizasyon reaksiyonları da vardır. 1950’lerde P.J. Flory tarafından, polimerizasyon işlemlerinin gerçek mekanizmalarını içeren daha net bir sınıflandırma geliştirildi. Flory, zincir polimerizasyonu ve aşamalı polimerizasyon mekanizmalarını önerdi. Polimerizasyon gerçekleşirken meydana gelen değişiklikleri izlemek için belirli deneysel yöntemler kullanılabilir. Bunlar arasında dilatometri, IR-spektroskopisi, Raman spektroskopisi, nükleer manyetik rezonans spektroskopisi, elektron spin rezonans spektroskopisi ve refraktometri yer almaktadır (Stuart, 2008).

Polimerlerin sentezinde, farklı kimyasal reaksiyonlardan faydalanılmaktadır ve bu reaksiyonlar genel işleyiş mekanizmaları açısından; katılma (zincir) polimerizasyon ve kondenzasyon (basamaklı) polimerizasyon şeklinde iki temel polimerizasyon yöntemi olarak sınıflandırılmaktadır. Genellikle, basamaklı polimerizasyonla elde edilen polimerler kondensat polimer, katılma polimerizasyonu ile elde edilen polimerler zincir polimeri olarak adlandırılır.

Katılma (zincir) polimerizasyonu

Bir zincir polimerizasyon reaksiyonu sırasında, polimer zincirinin büyümesinden sorumlu aktif merkez, ardışık monomer birimlerinin tek bir moleküle eklenmesiyle ilişkilidir (Young and Lovell 1991; Stevens 1999; Yokozawa and Yokoyama 2009). Zincir polimerizasyonunun karakteristik özellikleri aşağıdaki gibidir (Stuart 2002):

Büyüme, zincirin bir ucuna monomerin eklenmesiyle gerçekleşir.

Uzun reaksiyon sürelerinde bile reaksiyon karışımında bir miktar monomer kalır.

- Polimerin moleküler ağırlığı hızla artar.
- Reaksiyonun farklı aşamalarında farklı mekanizmalar çalışır.
- Polimerizasyon hızı başlangıçta artar ve daha sonra sabit hale gelir.
- Reaksiyonun başlaması için bir başlatıcıya ihtiyaç vardır.

Tipik olarak bir zincir polimerizasyon reaksiyonu üç aşamadan oluşur: başlatma, büyüme ve sonlanma. Organik polimer sentezinin en genel ve endüstriyel açıdan en önemli yöntemi, katılma (zincir) polimerizasyonudur (Tsang *et al.* 2003). Bu polimerizasyonda genellikle doymamış bağlar içeren stiren, etilen, vinil klorür gibi dien veya vinil monomerleri kullanılır. Serbest radikal, iyonik, kompleks ve halka açılması dahil olmak üzere farklı zincir polimerizasyon mekanizmaları vardır (Stuart 2008).

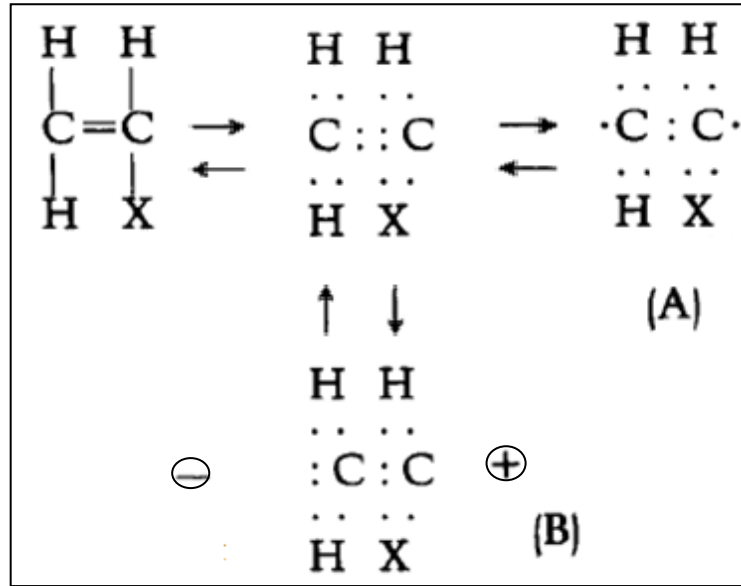
a) Radikalik Katılma Polimerizasyonu

Radikalik katılma polimerizasyonu ile ilgili ilk çalışmalar organik kimya literatüründe 1970'lerin başında ortaya çıktı (Giese 1986; Motherwell and Crich 1992; Moad *et al.* 2008). Radikalik katılma polimerizasyonu, genellikle vinil monomerlerini ($\text{CH}_2=\text{CHX}$ veya $\text{CH}^*=\text{CXY}$) içeren en önemli (zincir) polimerizasyon mekanizmasıdır. Başlatma adımı sırasında, küçük bir başlatıcı madde kullanımı gereklidir. Bunlar, ısıtıldığında veya ışınlandığında kolayca parçalanan malzemelerdir. Benzoil peroksit ve azobisisobütironitril (AIBN), yaygın olarak kullanılan iki başlatıcıdır. Radikalik polimerizasyon, plastik, kauçuk ve fiber gibi polimerik malzemeleri üretmek için endüstriyel olarak en yaygın yöntemdir (Moad and Solomon 1995; Coessens *et al.* 2001). Radikalik katılma polimerizasyonu da başlama, büyüme ve sonlanma olmak üzere üç aşamadan oluşmaktadır. Radikalik katılma polimerizasyonun başlama basamağında, aktif monomerik merkezlerin oluşumu gerçekleşir. Büyüme basamağı ise, hızlı bir şekilde polimer zincirinin büyüdüğü basamaktır. Sonlanma basamağında ise, büyümüş olan radikalik zincirin orantılı ve orantısız olmak üzere iki yolla aktivasyonunun kaybettirilmesi sağlanır (Ram 1997; Braunecker and Matyjaszewski 2007).

b) İyonik Katılma Polimerizasyonu

İyonik zincir polimerizasyonu, serbest radikal polimerizasyonuna uygulanabilir bir alternatif sağlar. Bu tür bir işlem, polimer zincirinin büyüyen ucundaki reaktif merkezin iyonik karakterde olması durumunda gerçekleşebilir. Katyonik polimerizasyonlar için monomerler -OR, vinil grupları ve fenil grupları gibi elektron veren sübstitüe edicileri içerirken, anyonik polimerizasyonlar için monomerler -CN, -COOH, -COOR ve halojenler gibi elektron çeken sübstitüe edicileri içerir. Katyonik polimerizasyonun başlangıç aşamasında, monomerin bir elektrofil ile reaksiyonu sonucu karbo katyon olarak adlandırılan reaktif ara ürünler oluşturulur (Ram 1997; Stuart 2008).

Radikalik ve iyonik katılma polimerizasyonu Şekil 3'teki gibi gerçekleşmektedir.



Şekil 3. Radikalik (A) ve iyonik (B) katılma polimerizasyonu (Ram 1997).

Kondensasyon (basamaklı) polimerizasyonu

Aşamalı polimerizasyonlar, monomerler üzerindeki reaktif fonksiyonel grup çiftleri arasındaki ardışık reaksiyonları içerir (Yokozawa and Yokoyama 2009). Bu tip polimerizasyon işleminin karakteristik özellikleri aşağıdaki gibidir (Stuart 2002):

- Büyüme matriks boyunca gerçekleşir.
- Monomer türlerinde hızlı bir azalma söz konusudur.
- Reaksiyon boyunca molar kütle yavaş yavaş artar.
- Reaksiyon boyunca mekanizma değişmez.
- Fonksiyonel grup sayısı azaldıkça polimerizasyon hızı azalır.
- Reaksiyonu başlatmak için herhangi bir başlatıcıya gerek yoktur.

Küçük bir molekülün uzaklaştığı basamaklı polimerizasyon reaksiyonlarına polikondensasyon denir. Bu polimerizasyonlar, bir organik baz (bir alkol veya bir amin gibi) ile bir organik asit (bir karboksilik asit veya bir asit klorür gibi) arasındaki küçük moleküllerin (su gibi) uzaklaştığı reaksiyonu içerir.

Kondensasyon, çeşitli fonksiyonel gruplara sahip polimerlerin sentezinde kullanılan bir polimerizasyon yöntemidir. Moleküller arası polimer iskeletleri arasındaki güçlü etkileşimler sayesinde polimerler yüksek termal özelliklerle, güçlü mekanik özellikler gösterir ve kimyasal dirençleri onları potansiyel olarak yararlı malzemeler haline getirmektedir. Genellikle kondensasyon kademeli bir büyümeyle ilerler. Her derece polimerizasyona sahip moleküller arasında yoğunlaşma reaksiyonlarının meydana geldiği bir polimerizasyon tarzıdır (Yokoyama and Yokozawa 2007, Carothers 1936; Flory 1946).

Kondensasyon polimerizasyonu, hidroksil ($-OH$), karboksil ($-COOH$) ve amin ($-NH_2$) gibi fonksiyonel grupları taşıyan aynı veya farklı iki molekülün birleşmesi sonucunda gerçekleşmektedir (Flory 1941; Yokozawa and Yokoyama, 2009; Mallakpour and Zadehnazari, 2011). Polimerizasyon devam ettikçe uçlarında işlevsel grupların bulunduğu küçük molekül polimerler biraraya gelerek daha büyük polimer moleküllerini oluşturmaktadır. Ard arda devam eden büyümelerden sonra molekül kütlesi çok fazla olan büyük polimer molekülleri ortaya çıkmaktadır. Kondensasyon polimerizasyonu, basamak basamak ilerlediğinden ona basamaklı polimerizasyon da denilebilmektedir (Sarıkaya 2003).

Kopolimerizasyon

Kopolimerizasyon, iki veya daha fazla farklı türde monomer içeren polimer zincirlerinin sentezini içerir. Kopolimerlerin bileşimi, kopolimer denklemi kullanılarak belirlenebilir. Bir monomer ve başka bir monomerin kopolimerizasyonu için, monomerin büyüyen serbest radikale eklenme oranının yalnızca radikal zincirindeki uç grubun doğasına bağlı olduğu varsayılmaktadır (Billmeyer 1984; Lutz 2013).

Çapraz bağlanma

Çapraz bağlanma, polimer zincirleri arasında kovalent bağların oluşumunu içermektedir. Çapraz bağların varlığı, malzemenin sonuçta ortaya çıkan özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir. Çapraz bağlanmamış veya hafif çapraz bağlanmış polimerler daha yumuşak ve esnek olma eğilimindeyken, yoğun çapraz bağlı polimerler kırılkan ve sert olma eğilimindedir. Bazı polimerler ısı ve/veya basınç uygulanmasıyla çapraz bağlanırken, diğer polimerler oda sıcaklığında meydana gelen bir kimyasal reaksiyonla çapraz bağlanabilir. Amino grup reçinelerden, üre-formaldehit ve melamin-formaldehit, formaldehitin sırasıyla üre ve melamin ile yoğunlaşma reaksiyonları ile oluşturulur. Moleküllerin uçlarındaki amin grupları yüksek düzeyde çapraz bağlı yapıların oluşmasına yol açar. Doymamış polyesterler genellikle serbest radikal kürleme maddesinin varlığında stiren gibi vinil tipi moleküller kullanılarak çapraz bağlanır. Peroksit kürleme maddeleri yaygın olarak kullanılır ve polyesterleri oda sıcaklığında çapraz bağlamak için metil etil keton peroksit kullanılabilir. Silikon elastomerler peroksit kürleme maddeleri kullanılarak da çapraz bağlanabilir. Örneğin polidimetil siloksan oda sıcaklığında benzoil peroksit ilavesiyle çapraz bağlanabilir; burada ikincisi iki metil grubuyla reaksiyona girerek $Si-CH_2-CH_2-Si$ köprüleri oluşturmaktadır (Maitra and Shukla 2014; Shen *et al.* 2018; Song and Wang 2020).

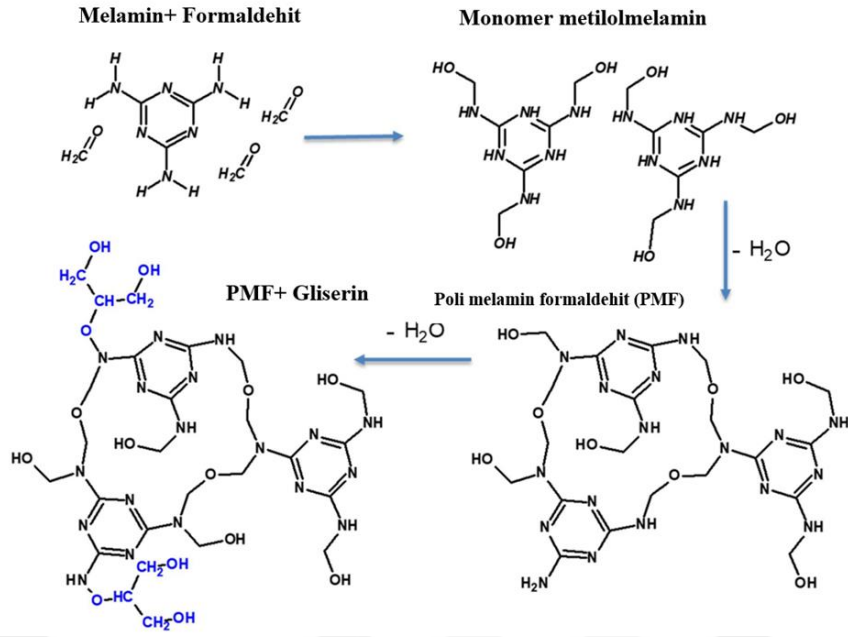
Polimerlerin kullanım alanları

Hem doğal hem de sentetik polimerler, insan hayatının rahatlığı ve kolaylaştırılmasında dikkate değer bir şekilde yer alır ve bilişim teknolojileri, ilaç, beslenme, iletişim, ulaşım, sulama, konteyner, giyim, binalar, otoyollar vb. alanlarda direkt olarak sorumludur. Polimerler giyecekler, ambalaj koruma ve bazı ürünler, ev yapı malzemeleri ve taşımacılıkta yaygın olarak kullanılmaktadır.

Melamin formaldehit reçinesi

Melamin-formaldehit reçinesi, melamin ve formaldehitin polikondensasyonu sonucu oluşan aminogrubu reçinedir. Amino grup reçinesi kavramı, aminlerle aldehitlerin yaptıkları tepkimelerle oluşan polimer maddeler için kullanılan bir kavramdır. Yaygın kullanılan amin bileşikleri melamin ve üre iken, aldehit olarak ise formaldehit kullanılmaktadır. Formaldehit ve melamin arasında oluşan tepkimelerde formaldehit, melamindeki (2, 4, 6- triamino-1, 3, 5- triazin) amin gruplarına bağlanarak değişik sayıda metilol grupları içeren türevler oluşturmaktadır. Metilol grubunun sayısı en fazla altı olabilir. Suda çözünebilir özelliği olan metilol grupları yüksek sıcaklıklarda eter veya metilen köprüleri üzerinden çapraz bağlanma oluşturarak melamin – formaldehit reçinesine dönüşürler (Gümüş, 2001).

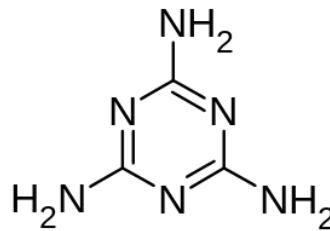
Melamin suda üreden daha az çözünür. Bu nedenle hidrofobik (suyu sevmeyen) ara ürünlerin oluştuğu aşamada melamin formaldehit reçine oluşumu halinde üre formaldehit reçine oluşumundaki kondensasyon polimerizasyonundan daha çabuk gerçekleşmektedir. Bu sebeple, hidrofobik ara ürünler melamin formaldehit kondensasyon polimerizasyon reaksiyonunun başlangıç evresinde görülmektedir. Melamin formaldehit reçinelerinde %50 oranına kadar dolgu maddeleri kullanılabilir. Bu amaçla; hindistan cevizi kabuğu tozu, odun talaşı, nişasta, kaolin gibi organik dolgu maddeler kullanılmaktadır. Melamin reçinesi, koyu renginin istenmediği fakat dayanıklılık bakımından fenol reçinesi özelliklerinin istendiği durumlarda, az miktarda olmak üzere sert odun kontrplâklarının yapımında daha pahalı olmasına rağmen, fenolik reçinelerin yerine kullanılmaktadır.



Şekil 4. Melamin formaldehit köpüğünün oluşum mekanizması

Melamin

Melamin plastik madde üretiminde kullanılan ve formaldehit ile tepkimeye girdiğinde ısının etkisiyle sertleşen ve %66 oranında azot içeren endüstriyel bir organik maddedir. Melamin ilk olarak Alman kimyager Justus von Liebig tarafından 1834 yılında sentezlenmiştir. 1958 yılında büyükbaş hayvanlar için protein dışında bir azot kaynağı olarak kullanılmış; bebek besinleri, plastik oyuncaklar ve hayvan yemlerinde kullanımı yaygınlaşınca toksisitesinden dolayı 1978 yılında yasaklanmasına karar verilmiştir. Melamin düşük konsantrasyonda toksik değildir. Melamin (C₃H₆N₆), 1,3,5-triazin-2,4,6-triamin, üç reaktif amin grubu ve aromatik triazin halkası içeren, pKa değeri 5,05 olan zayıf bir bazdır.



Şekil 5. Melaminin molekül yapısı

Triazin halkasındaki azot atomları, hidrojen bağı oluşumunda alıcı (acceptor), üç primer amin grubu ise verici (donor) olarak etkir. Melaminin hidrojen bağı oluşturma özelliği, urasil gibi nükleobazlarla etkileşimini de sağlar. Melamin, üre, disiyanamid veya hidrojen siyanürden yüksek sıcaklık ve basınç koşullarında sentezlenir.

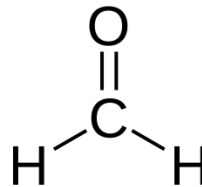


Süreç, 90-150 bar ve 380-450°C’de katalizör kullanımı olmadan sıvı fazda gerçekleşebilir. Üre ilk olarak izosiyanik aside, daha sonra siyanürik aside dönüşmektedir. Siyanürik asit ise NH₃ ile tepkimeye sokularak melamin oluşturmaktadır. Bir başka sentez işlemi ise, modifiye edilmiş Al₂O₃ gibi bir katalizör varlığında 1-10 bar; 350-450°C koşullarında da yürütülebilir. Üre önce izosiyanik aside dönüşür. Ardından karbodiimid veya siyanamide dönüşümü gerçekleşir ve bunu melamin oluşumu izler.

Melamin, endüstride yaygın kullanımı olan kimyasal bir bileşiktir. Laminantlarda, yemek takımlarında, yapışkanlarda, yapıştırıcı bileşeni olarak, gömlek ve pantolon kumaşları ile alev geciktirici materyallerde sıkça kullanılır. Ayrıca kontakt materyallerde, termoset polimerlerde kullanımı mevcuttur (Gümüş 2001).

Formaldehit

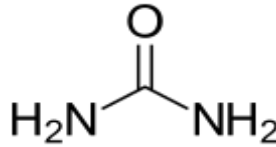
Alifatik aldehit serilerinin ilki olan formaldehit 1859’da Butlerov tarafından keşfedilmiş olup yirminci yüzyılın başından beri ticari olarak üretilmektedir (Kowatsch 2010). Çeşitli kimyasal reaksiyonları ve nispeten ucuz olması formaldehiti önemli endüstriyel kimyasal maddelerden biri haline getirmektedir. Oda sıcaklığındaki formaldehit, keskin kokuya sahip ve renksiz olan bir gazdır. Formaldehitin sulu çözeltisi ağırlıkça %37 ile %50 arasında değişmektedir. Formaldehit metanolün kontrollü katalitik oksidasyonu ile üretilmektedir. Bu proseste, metanol buharı ile hava karışımının 300°C -600°C aralığında ısıtılmış bakır oksit katalizörden geçmesi suretiyle formaldehit ile su karışımı elde edilmektedir (Ibeh 1998; Talaiekhosani *et al.* 2013). Formaldehit, tehlikeli bir kimyasal olup gözde, üst solunum yollarında ve deride tahrişe sebep olmaktadır. Çalışılan ortamda formaldehitin konsantrasyonunun sınır seviyesinin 1 mg/L’den az olması gerekmektedir. Formaldehitin kanserojen olduğuna ilişkin iddialar hala belirsizliğini korumaktadır. Henüz hiçbir ülke tarafından formaldehit kullanımı yasaklanmamıştır (Kowatsch 2010).



Şekil 6. Formaldahitin molekül yapısı

Üre

Üre, organik bir bileşik olup, formülü $\text{H}_2\text{N}-\text{CO}-\text{NH}_2$ 'dir. Karbonik asidin diamidi olan üre aynı zamanda karbamik asidin amidi olduğundan karbamid adı ile de bilinir. Ürenin ilk defa 1773 yılında keşfedildiği bilinir. Ancak şüpheden uzak kesin sentezi 1828'de Wöhler tarafından başarılmıştır. Keşfinden bu yana 50'den fazla tepkimede üre bir ürün olarak elde edilmiştir. Amonyum karbonatın $150-200^\circ\text{C}$ 'ye kadar ısıtılmasından üre elde edilir ki bu teknik bir metoddur. Wöhler sentezi olarak bilinen reaksiyonda ise; önce KCN ile PbO_2 karışımı ısıtılarak KCNO elde edilir. KCNO nun amonyum sülfat ile muamelesi sonucu hazırlanan amonyum siyanatın kızdırılmasıyla da üre elde edilir. Üre 132°C 'de eriyen rombik prizmalar veya iğne şeklinde renksiz kristaller verir. Su ve alkolde iyi çözünür. Kloroform, eter veya etil asetatta ise çözünmez. 132°C 'nin üstünde amonyak, siyanür asidi gibi ürünler vererek bozunur. Nitrik asit, sodyum hipoklorit veya sodyum hipobromit gibi bileşiklerin etkisiyle azot, su ve karbondioksit ayrışır. Seyreltik asit veya alkalilerle ısıtıldığında amonyak ve karbondioksit bozunur. En çok gübre ve hayvan yemi olarak kullanılan üreden ilaç ve plastik yapımında da faydalanılır. Üre asit ve tuzlarla bir takım katılma bileşikleri, bazı asitlerle de kondensasyon ürünleri veya üreidler verir. Naftalinin türevleriyle verdiği bileşikleri terapide kullanılır. Boya üretiminde de kullanılan üre aynı zamanda bitkiler için bir besin kaynağıdır. Nitrik asitle gübre ve patlayıcı madde olarak kullanılan üre nitrat adı verilen bir tuz oluşturur.

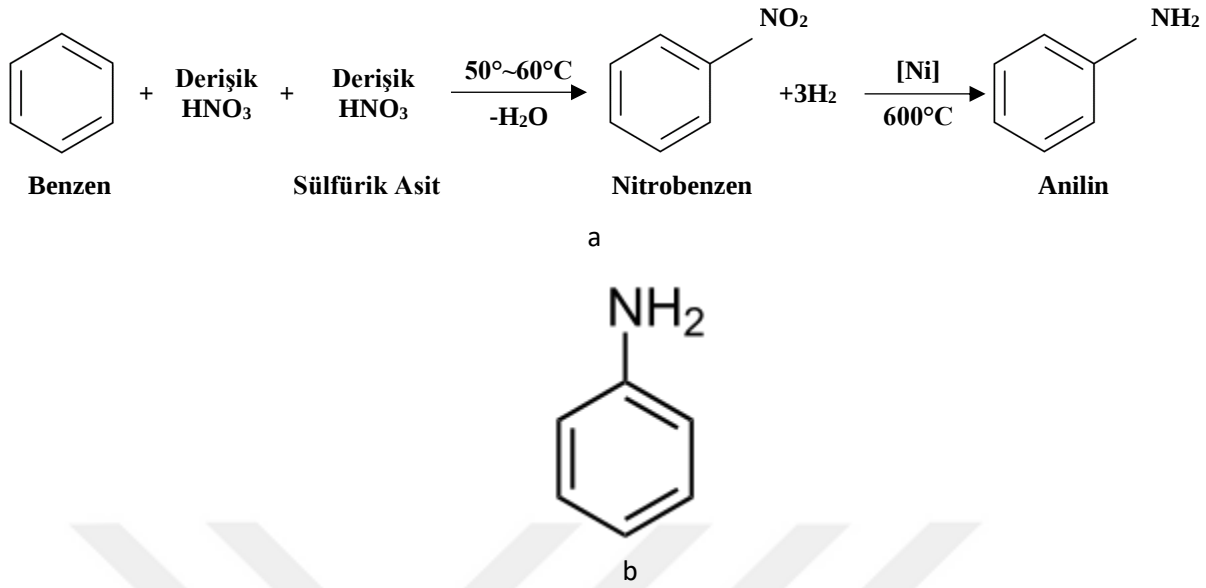


Şekil 7. Ürenin molekül yapısı

Anilin

Anilin, petrolden damıtılarak elde edilen, sıkça ahşap renklendirmesi için kullanılan bir tür boyadır. Aromatik sınıftan primer amin türevleri ilaç yapımında da kullanılan organik bir bileşiktir. Benzen halkasında karbonlardan birine bağlı H yerine NH_2 amin grubu bağlanmasıyla oluşur. Fenil amin ve aminobenzen de denir. İlk kez 1826 yılında O. Unverdorben tarafından indigo adlı bitkisel bir boya maddesinin damıtılmasıyla elde edildi. Boya endüstrisinde nitro benzenin ($\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$) indirgenmesinden elde edilir. Renksiz kokulu bir sıvıdır. Toksik etkisi şiddetlidir. 1,02 yoğunlukta $184,1^\circ\text{C}$ 'de kaynayan ve katı halde iken 6°C 'de eriyen kristal yapılıdır. Organik kimyada büyük önemi olan anilinden boya yapımında kullanılan ilkel maddeler elde edilmiştir. Bu yüzden deri boyamacılığında, fotoğrafçılıkta, matbaacılıkta kullanılan bu tür boyalar anilin boyalar olarak adlandırılır. Anilin bir benzen

halkasının bir amino grubuna bağlanması ile sentezlenir. Anilin endüstride genellikle aşağıdaki gibi nitrobenzen üzerinden iki aşamada sentezlenir:

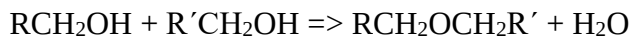


Şekil 8. (a) Anilinin sentezi ve (b) anilinin molekül yapısı

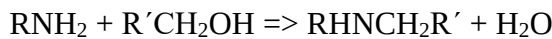
Melamin formaldehit reçinelerin polimerizasyon (kondensasyon) reaksiyonu

Melamin formaldehit açık renkli olup su direnci iyi olan bir reçinedir. Genelde dış ve nemli ortamlarda kullanılacak kompozitlerde ve laminatları oluşturan kâğıt tabakaların emprenye edilmesinde kullanılır. Maliyeti yüksek olduğundan kullanımını sınırlıdır. Bu nedenle su direnci iyi olan ve melamin formaldehite göre daha düşük maliyetle üretilen melamin üre formaldehit reçineleri üretilip, dış mekânlarda da kullanılabilir (Dunky 2003). Melamin formaldehitin kürlenmesinde ilk adım olarak formaldehit melamine eklenir (Şekil 9). Melamin formaldehit reaksiyonu en çok pH'dan etkilenir. Melamin, her eksosiklik amin grubu üzerinde en fazla iki adet, metilol grubu oluşturmak için ise altı adet formaldehit grubu ile reaksiyona girebilir (Frihart 2013; Aras 2021).

- İki hidroksimetil grubunun reaksiyonu ile bimetilen eter oluşumu;

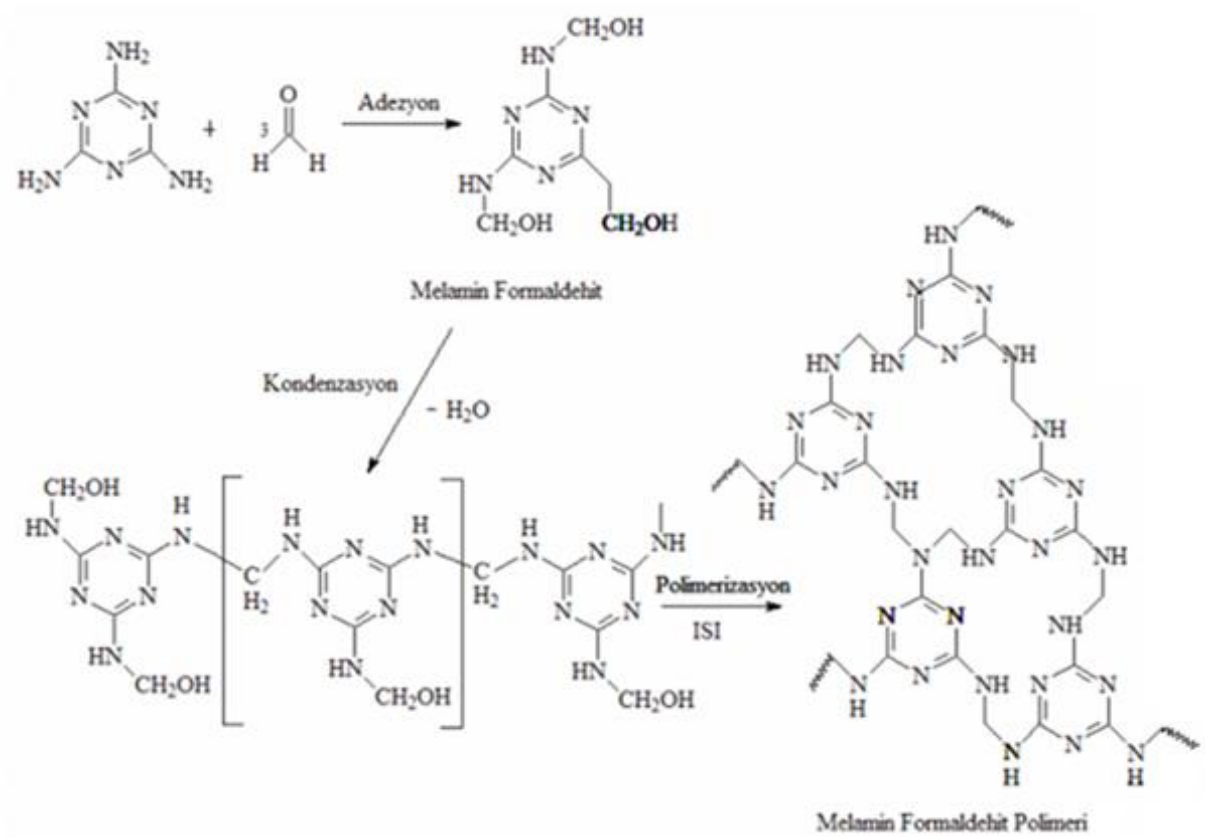


- Hidroksimetil grubunun amin grubu ile reaksiyonu sonucu oluşan metilen köprüsü;



Ticari olarak elde edilen melamin formaldehit, standart karıştırma ile reaktörlerde ısı polimerizasyonu ile üretilen bir oligomer karışımıdır. Normal uygulamalardaki formaldehitin melamine oranı (F/M) yaklaşık olarak 1,5-2'dir. Bu formülasyon spesifik uygulamalara bağlı olarak değişir. Melamin formaldehit köpüğünün pH'ı 9,9-10,3, katı madde miktarı ise %53-55 oranındadır. Reçinenin stabilizasyonunu ve polimerizasyonunu yavaşlatmak için reaksiyonun

sonunda pH değeri yükseltilir (Pizzi 2018). Şekil 9’da melamin ile formaldehitin kondenzasyon reaksiyonu verilmiştir (Pizzi 2003).



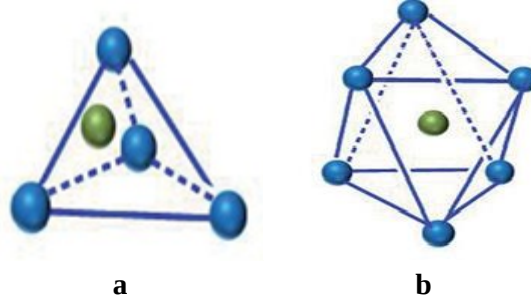
Şekil 9. Melamin ve formaldehitin kondenzasyon reaksiyonu

Son üründe iyi bir polimerizasyon sağlamak için melamin formaldehit tutkalının aktive edilmesi gerekir. Bu genellikle pH düşürülerek ve sıcaklık yükseltilerek gerçekleştirilir. Melamin formaldehite eklenen katalizörler, ısıtıldığında asidi serbest bırakan asitler veya asit öncüleridir. Sıklıkla, amonyum klorür veya sülfat gibi bir sertleştirici kullanılır.

Kil Mineralleri

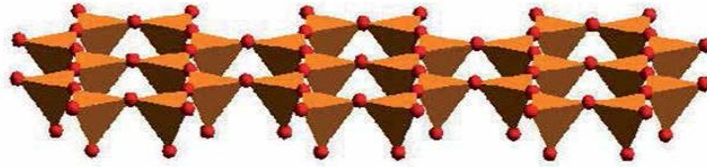
Kil, çapı 0,005 mm’den küçük olan ve asıl olarak kil parçacıklarından oluşan yumuşak, serbestçe bağlı, ince taneli doğal kaya veya toprak malzemelerine denir. Mineralin standart tanımına göre killer, büyük miktarda organik/doğal malzeme içeren turba, gübre, bazı topraklar vb. dışında çoğunlukla inorganik malzemelerdir. Kil parçacıkları, toprak içeren kayaların, seramik killerinin, buzul killerinin (büyük miktarda kırıntılı ve taşınmış kil dahil), mineral grubu feldispatın belli zaman aralıklarında geniş bir alanda hava etkisiyle aşınması ve erozyonu nedeniyle oluşur. Hava koşulları sırasında, hidroliz işlemi nedeniyle feldspat içeriği bozulur ve kaolinitler (kaolin killerindeki birincil mineraller) ve smektit (bentonit killerindeki birincil mineraller) gibi kil minerallerinin oluşumuna neden olur. Kil, çok az miktarlarda kuvars (SiO₂), metal oksitler (Al₂O₃, MgO gibi) ve organik madde varlığında bile bir veya birden fazla kil

mineraliyle birleşebilir (Kumari and Mohan 2021; Al-saeedi 2022). Killerin tüm tanımlarında tane boyutu önemli bir parametredir ve şu ana kadar genel olarak herhangi bir üst sınır kabul edilmemiştir. Killer boyut farklılıkları ve mineralojileri nedeniyle diğer ince taneli topraklardan ayırt edilebilir. Kil minerallerinden oluşmayan ince taneli toprakların (silt de denilebilir) tane boyutları kilden daha büyüktür. Bağımsız kil parçacıkları her zaman 0,004 mm'den küçüktür. Silt ve kil arasındaki fark disipline göre değişir. Jeologlar ve toprak bilimciler ayırma için genellikle 2 μm (killer siltlerden daha incedir) parçacık boyutunu dikkate alırken, sedimentologlar 4-5 μm ve kolloid kimyacıları ise 1 μm kullanırlar (Guggenheim and Martin 1995). Kilin bir başka tanımı da toprağın doğal olarak meydana gelmiş ve ince taneli mineralleri kapsayan bölümü olarak yapılmaktadır (Günister 2004). Kil sınıflandırması, içeriklerine göre hidro silikat veya alümina silikat içerme durumuna göre yapılmaktadır. Aslında kil yapısı, hidroksil grupları ile birlikte silisyum, alüminyum veya magnezyum, oksijen ve çeşitli katyonlar içermektedir. Silika ve alümina tabakalar farklı bileşim oranlarında birleşmiş ve değişen tabakalar arası mesafeler ile üst üste gelerek istiflenmiştir. Oluşan kil minerallerini 1,0 nm kalınlığında silikat tabakalardan oluştuğu için tabakalı silikat olarak da adlandırmak mümkün olmaktadır (Azeez *et al.* 2013). Kil minerallerinin seramik, tarım, inşaat gibi birçok kullanım alanı bulmaktadır. Bu kadar çok kullanım alanının olması, interkalasyonu, iki boyutlu yarı manyetizma özellikleri, kristal özellikleri ve yapısal faz geçişi özellikleri ile açıklanabilir. Özellikle son yıllarda, kil minerallerinin nanokompozitlerde absorbent madde olarak, sağlık sektöründe antibakteriyel madde olarak, nükleer atıkları depolamada ve pestisit taşıyıcı olarak birçok alanda yaygınlaştığı görülmektedir (Gürses 2015). Kil mineralleri, neredeyse tamamı kristal yapılı olup özellikle alüminyum veya toprak alkali metallerin silikatlarından oluşmuş katman örgüye sahip silikatlardır. Killerin bu katman yapıları tetrahedral ve oktahedral olmak üzere iki farklı geometrik, atomik kristal yapıdan oluşmaktadır (Brigatti *et al.* 2006). Bu iki yapı ilk olarak 1930 yılında Pauling tarafından kil minerallerinin X ışınları difraksiyonu (XRD) ile ortaya konmuştur. (Brown ve Brindley 1980). Killerin içerisinde üçer tane oksijen veya hidroksil gruplarından oluşan birbirini takip eden tabakalar arasında katyonlar (alüminyum, demir veya magnezyum) bulunduran yapıya oktahedral (O) yapı, kenarlarında oksijen atomu bulunan bir düzgün dört yüzlünün ortasında bir silikon atomunun yerleşmiş haline ise Tetrahedral (T) yapı denir (İşçi 2007). Birbirinden farklı yapıların değişik şekillerde üst üste gelmesiyle silikatlar oluşmaktadır ve buna göre de sınıflandırılmaktadır.



Şekil 10. Tetrahedral (a) ve oktahedral (b) birimlerin yapısı (Kumari, N. and Mohan, C., 2021)

Tetrahedral tabakadaki ana baskın atom Si^{+4} kasyonu formunda bulunur. Dörtüzlü tabakanın temel yapı taşı, silika tetrahedra olarak bilinen dört oksijen atomu ile çevrelenmiş bir Si atomu birimidir. Dörtüzlü tabaka, Şekil 10'da gösterildiği gibi, her tetrahedranın üç oksijeninin en yakın üç tetrahedra ile paylaşılmasıyla oluşturulur. Bu oksijen atomları, tüm tetrahedra çiftlerini (daha fazla veya daha az) bir düzlemde birbirine bağlayan bazal oksijen olarak bilinir, dördüncü oksijen ise bazal oksijen olarak bilinen atom serbest kalır ve apikal oksijen olarak bilinen diğer çokyüzlü elementlerle bağ oluşturur. Apikal oksijenlerin hepsi ayrı bir düzlemde ve hem tetrahedral hem de oktahedral tabaka arasında bir bağlantı sağlar (Bergaya and Lagaly 2013). Dörtüzlü başına yalnızca bir apikal O mevcut olduğundan, her tetrahedron, oktahedral tabakadaki bir oktahedron ile bir köşeyi paylaşır. Dört yüzlü levha, Si^{+4} yerine Al^{+3} 'ün izomorf yer değiştirmesi nedeniyle negatif yük taşıyor ve tetrahedral levhada yük eksikliği ortaya çıkarmaktadır. Yaygın tetrahedral kasyonlar Si^{+4} , Al^{+3} ve Fe^{+3} 'dir.



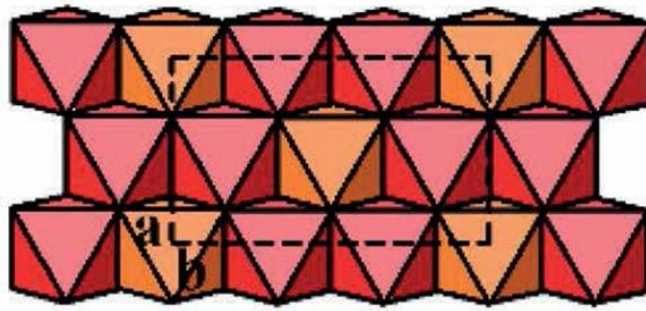
Şekil 11. Tetrahedral birimin tetrahedral tabakayı oluşturacak şekilde düzenlenmesi (Kumari, N. and Mohan, C., 2021)

Oktahedral tabakalardaki ana baskın atomlar, altı oksijen atomu veya hidroksil grubu ile çevrelenmiş Al^{+3} veya Mg^{+2} olup, oktahedron olarak bilinen sekiz taraflı yapı bloğunu oluşturur. Çünkü oktahedral tabaka iki biçimde mevcuttur: dioktahedral veya trioktahedral tabaka.

a. Dioktahedral tabakada üç pozitif değerlik bulunan alüminyum mevcut olduğunda, yüklerin dengelenmesi için bölgelerin yalnızca üçte ikisi doldurulur ve bu da dioktahedral tabakanın oluşmasıyla sonuçlanır. İki pozitif yük değerliliğine sahip magnezyum mevcut olduğunda, üç konumun tümü yükü dengelemek için doldurulur ve bu da trioktahedral tabakanın oluşmasıyla sonuçlanır (Bergay and Lagaly 2013). Bu nedenle, di-oktahedral tabaka

için Al^{+3} , $Al_2(OH)_6$ birim hücre formülüne sahip ana baskın atomdur ve genellikle iki Al^{+3} atomunun altı oksijen/veya hidroksil iyonu ile koordine edildiği stokiyometrik eşdeğer $Al(OH)_3$ olarak kısaltılır.

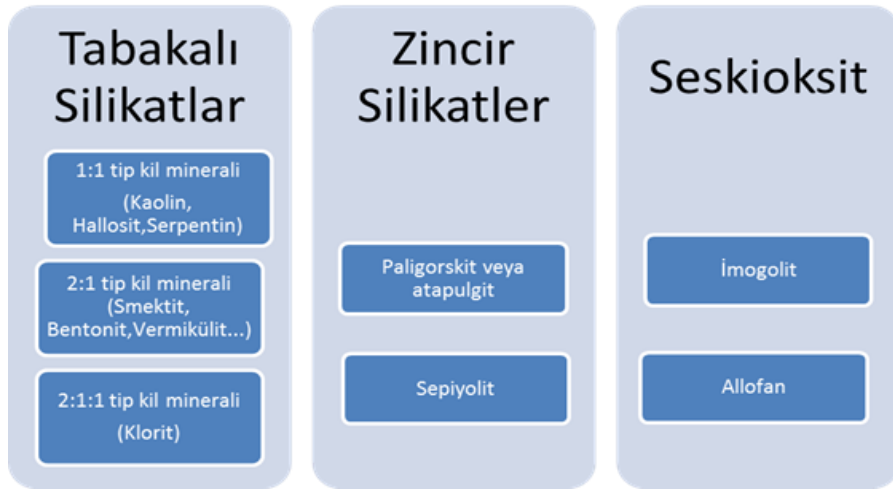
b. Trioktahedral tabakada, Mg^{+2} , $Mg_3(OH)_6$ (ayrıca $Mg(OH)_2$ olarak da yazılır) birim hücre formülüne sahip altı oksijen/veya hidroksil iyonu ile üç Mg^{+2} atomunun koordine edildiği ana baskın atomdur. Gibbsit veya hidrargillit (sulu alüminyum oksit, $Al_2(OH)_6$ veya $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$) ve brunit (magnezyumun hidröz oksidi, $Mg(OH)_2$), kil kimyası, mineralojisi ve yapısı ile ilgili literatürde genel olarak tanımlanan minerallerdir. Oktahedral tabaka, çeşitli oktahedraillerin yatay olarak birbirine bağlanmasıyla her bir oktahedranın iki oksijeninin paylaşılmasıyla oluşur (Şekil 12) (Schulze 2002; Sarkar *et al.* 2018).



Şekil 12. Oktahedral tabakayı oluşturacak şekilde oktahedral birimin düzenlenmesi (Kumari, N. and Mohan, C., 2021)

Kil minerallerinin sınıflandırılması

Alüminosilikat katmanları, ortak oksijen atomlarıyla bağlanan tetrahedral ve oktahedral tabakaların birleşiminden oluşan fillosilikatların temel yapısal birimlerinden oluşur. Hem tetrahedral hem de oktahedral tabakalar, oksijen atomlarının farklı katmanlar halinde paylaşılmasıyla birbirine bağlanan fillosilikatların ana bileşenleridir (yaprak benzeri veya plaka benzeri yapıları nedeniyle fillosilikatlar olarak bilinirler). Fillosilikat, Si baskın tetrahedral birim ve Al veya Mg egemen oktahedral birimden oluşan ve levha şeklinde düzenlenmiş en yaygın kil mineralleridir. Tetrahedral ve oktahedral tabakaların sayısına ve bunların düzenine bağlı olarak fillosilikatlar, katman ve zincir silikatlar, seskioksit ve diğer inorganik mineraller dahil olmak üzere aşağıdaki kategorilere ayrılır: Kil, tetrahedral ve oktahedral tabakaların katmanlar halinde paketlenme şekline bağlı olarak sınıflandırılabilir. Toprak ortamında bulunan kil minerallerinin ana grupları, Şekil 13'te gösterildiği gibi tabaka ve zincir silikatları, seskioksitleri ve diğer inorganik mineralleri içerir (Pohl 2011).



Şekil 13. Kil minerallerinin sınıflandırılması.

a. Tabakalı Silikatlar

T-O-T katmanları arasında belirgin bir tekrarlanan mesafe ile üstte ve altta tetrahedral katmana bağlı düzlemsel oktahedral katmandan oluşan bir silikat türüdür. Bunlar toprağın ana bileşenidir ve katmanlar arasında suyun mükemmel tutucuları olarak bilinirler. Bu gruptaki mineraller ayrıca dioktahedral ve trioktahedral olarak sınıflandırılır (Barton and Karathanasis 2002). Kildeki tetrahedral ve oktahedral tabakaların sayısı ve düzenine göre silikat tabakası üç kategoriye ayrılır:

1. 1:1 tipi kil minerali
2. 2:1 tipi kil minerali
3. 2:1:1 tipi kil minerali

1. 1:1 Tabakalı silikat

Her bir katman bir tetrahedral (SiO_4) ve bir oktahedral tabakadan (AlO_6) oluşur. Levhalar O^{2-} iyonlarının paylaşılmasıyla birbirine bağlanır. Kaolin ve halloysit bu kategori altındaki örneklerdir (Schroeder 2020).

Kaolin, $\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ kimyasal formülüne sahip 1:1 kil mineralidir. Kaolince zengin olduğu tespit edilen kayalar kaolin veya Çin kili olarak tanımlanmaktadır (Perry 2011).

Kaolin, çok yaygın olan kaolinden türetilir. Feldispat gibi alüminyum silikatın kimyasal olarak ayrışması, yumuşak, genellikle beyaz bir mineralin (dioktahedral fillosilikat kili) oluşmasıyla sonuçlanır. Dikit ve nakrit, kimyasal olarak kaoline benzeyen ancak doğası gereği amorf olan kaolinin nadir formlarıdır. Kaolinin triklinik simetriye sahip, elektrostatik olarak nötr olduğu bulunmuştur. Hidrojen bağı, eşlenen katmanların oksijen atomları ve hidroksil iyonları arasında oluşur. Hidrojen bağları zayıf olduğundan katmanlar arasındaki rastgele

hareketler oldukça yaygındır ve bu da kaolin minerallerinin kristalliğinin triklinik kaoline göre daha düşük olmasına neden olur. Kaolinin ideal yapısı yüksüzdür. Dolayısıyla kaolinin yapısı hidrojen bağı nedeniyle sabittir; katmanlar arasında genleşme yoktur veya kil ıslandığında büzülme-şişme kapasitesi düşüktür. Kaolin suda şişmez ve düşük yüzey alanına ve katyon değiştirme kapasitesine sahiptir. Düşük yüzey alanı ve az miktarda yer değiştirme nedeniyle kaolin iyonlarının adsorbe etme kapasitesi düşüktür (Unuabonah *et al.* 2007). Dikit ve nakrit, çift 1:1 katmandan oluşan ve monoklinik simetriye sahip olan kaolinin politipik formlarıdır. Dikit ve nakrit, iki 1:1 silikat tabakasının farklı istiflenme dizileri ile kendilerini farklılaştırırlar (Bonazzi *et al.* 2005).

1:1 katmanlı bir yapıya sahip olan Halloysit minerali, iki katman arasında tek bir su molekülü katmanına sahiptir ve bu da onu kaolinden farklı kılmaktadır. Kaolin parçacıklarının yassı formunun aksine boru şeklindeki formuyla gösterilmiştir. Halloysit hafif ısıtıldığında dehidrasyon meydana gelir ve geri dönüşü olmayan bir şekilde kaoline dönüşür. Halloysit, $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5 (\text{OH})_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ bileşimi ile hidratlı bir forma sahiptir. Esas olarak nispeten düşük sıcaklıklarda (60°C) veya düşük bağıl nem koşullarına maruz bırakıldığında geri dönüşü olmayan bir şekilde suyu alınmış bir çeşide dönüşür. Halloysit'in susuz formu, kaolin tabakası kalınlığında (yaklaşık $7,2 \text{ \AA}$) bazal boşluğa sahipken, hidratlı formun bazal aralığı yaklaşık $10,1 \text{ \AA}$ 'dur. $2,9 \text{ \AA}$ 'luk fark su tabakasının kalınlığından kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak, hidratlı formdaki halloysit katmanları, dehidrasyon sırasında kaybolan monomoleküler su katmanları ile ayrılır (Bonazzi *et al.* 2005).

Serpantin, bir grup sulu, magnezyum açısından zengin silikat mineralidir ve $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5 (\text{OH})_4$ bileşimine sahip yaygın bir kaya oluşturuucu mineraldir. Serpantin genellikle üç polimorfik formda görünür: asbest olarak kullanılan lifli bir tür olan krizotil; antigorit, oluklu levhalarda veya liflerde bir çeşitlilik mevcuttur; ve lizardit, çok ince taneli, yassı bir çeşittir. Serpantin genellikle grimsi, beyaz veya yeşildir (demirin magnezyumun yerini alması nedeniyle) ancak sarı (krizotil) veya yeşil-mavi (antigorit) de olabilir. Serpantin oluşumu 500°C 'nin (930°F) altında çeşitli magnezyum silikatlara (örneğin forsterit veya enstatit) su veya bazen silika eklenmesiyle gerçekleşir (Balucan 2012).

2. 2:1 Tabakalı silikat

Katmanlı silikat killerinin çoğu toprakta yaygın olarak bulunur. İki tetrahedral tabaka arasına sıkıştırılmış tek bir oktahedral tabakanın tek bir kompozit tabaka oluşturduğu mika yapısına dayanır. Bu nedenle bunlara 2:1 tabaka denir. Talk [$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10} (\text{OH})_2$] ve Pirofilitin [$\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10} (\text{OH})_2$] trioktahedral ve dioktahedral üyeleri temsil ettiği silikatlardır. Dioktahedral ve trioktahedral katmanlı silikatlarda, yarım birim hücredeki (tek Si_4O_{10}) mevcut üç bölgeden

sırasıyla iki ve üç oktahedral bölge işgal edilmiştir (Anthony *et al.* 2000). Bu tür kil mineralleri, iki tetrahedral tabaka arasına sıkıştırılmış bir oktahedral tabakadan oluşur. Ayrıca iki kategoriye ayrılırlar:

A. Genleşen kil mineralleri: Smektit grubu ve Vermikülit

B. Genleşmeyen kil mineralleri: illit (mika grupları)

A. Genleşen kil mineralleri: Bu grupta ağırlıklı olarak smektit grubu kil mineralleri ve vermikülit kil minerali yer alır. Islak olduklarında şişme davranışları sırasında meydana gelen katmanlar arası genleşmeleriyle tanınırlar.

Smektitler esas olarak trioktahedral 2:1 (talk) veya dioktahedral 2:1 (pirofillit) yapıya dayalıdır ve oktahedral veya tetrahedral katmandaki izomorf süstitüsyonun varlığı nedeniyle bu nötr yapılardan farklılık gösterir. Kil minerallerinin smektit grubu ayrıca saponitler (trioktahedral) ve montmorillonit (dioktahedral) olarak ikiye ayrılır. Smektit ailesinin bir diğer önemli üyesi ise Bentonittir. Bentonit kili, tortul kil olarak da bilinir ve benzersiz su tutma özelliğine sahiptir. Bu grubun en önemli üyeleri Montmorillonittir. Beidellit, nontronit ve saponit ise diğer önemli üyeleridir. Smektitin (örneğin Montmorillonit) pul benzeri kristalleri genişleyen bir kafes, 2:1 tipi kil mineralinden oluşur. Her katman, iki tetrahedral (silika) tabaka arasına sıkıştırılmış bir oktahedral tabakadan oluşur. Bir ünitenin alt tetrahedral tabakasında ve başka bir ünitenin üst tetrahedral tabakasında bulunan oksijen atomları arasında hafif bir çekim bulunur. Bu, değiştirilebilir katyonlar ve su tarafından işgal edilen katmanlar arasında değişken bir boşluğa izin verir. Bu nedenle, değiştirilebilir katyonlar ve su, katmanlar arası boşluğa kolayca girebilir ve bu da 9,6 Å ile 20 Å arasında değişebilen katmanların genişlemesine neden olur (Wypych and de Freitas 2022). Montmorillonitte, oktahedral tabakanın bazı bölgelerinde magnezyum iyonlarının yerini alüminyum iyonları alır ve benzer şekilde tetrahedral tabakadaki bazı silikon iyonlarının yerini alüminyum iyonları alabilir. Bu tür yer değiştirme, kil minerallerinin yüzeyinde negatif yüke neden olan izomorfik yer değiştirme olarak bilinir. Negatif yükün büyüklüğü süstitüye olan atomların/iyonların sayısına bağlıdır. Birim hücrenin bu negatif yükleri tipik olarak değiştirilebilir hidrathlı alkali (Li, Na, K, Rb, Cs, Fr) veya alkali toprak (Be, Mg, Ca, Sr., Ba, Rd) katyonları ile dengelenir. Bu nedenle bu minerallerin katman yük yoğunluğunun birim formül başına 0,2-0,6 arasında olduğu bulunmuştur (Uddin, 2008). Yapısı, kimyasal bileşimi, değiştirilebilir iyonları, yüksek katyon değiştirme kapasitesi, yüksek yüzey alanı ve yüksek adsorpsiyon kapasitesi gibi birçok benzersiz özelliklerinden sorumludur.

İzomorfik yer değiştirmenin neden olduğu yük eksikliğini dengelemek için gereken katyon miktarına katyon değişim kapasitesi (KDK) adı verilir. Montmorillonit için KDK, 100 gram başına 80 ila 200 milieşdeğer arasında değişir. Montmorillonit killerinin termal stabilitesi

çok zayıftır. Bu mineraller yüksek katyon değiştirme kapasitesi, şişme ve büzölme kapasitesi gibi belirgin özellikler göstermektedir. Smektit ağırlıklı topraklar kurumaya maruz kaldığında, genellikle geniş çatlaklar ortaya çıkar ve sertlikleri nedeniyle toprağın işlenmesini zorlaştırır (Murray 2006).

Bentonit, %98'i montmorillonitten oluşan alüminyum fillosilikat kilinin saf olmayan bir formudur ve volkanik külün yerinde ditrifikasyonu veya ana kayanın çoğunlukla su varlığında mekanik ve kimyasal olarak ayrışması yoluyla üretilir. Dallanma yapısından dolayı çok yönlü bir mineraldir. Silisyumun iki oktahedral alüminyum oksit tabakası arasına sıkıştırılmış üç değerlikli katyonlarla değiştirilmesi, burada alüminyumun iki değerlikli katyonlarla değiştirilmesi ve hidroksit grubunun her bir levhacık kenarında bulunması tiksotropik doğaya neden olur (Murray 2006).

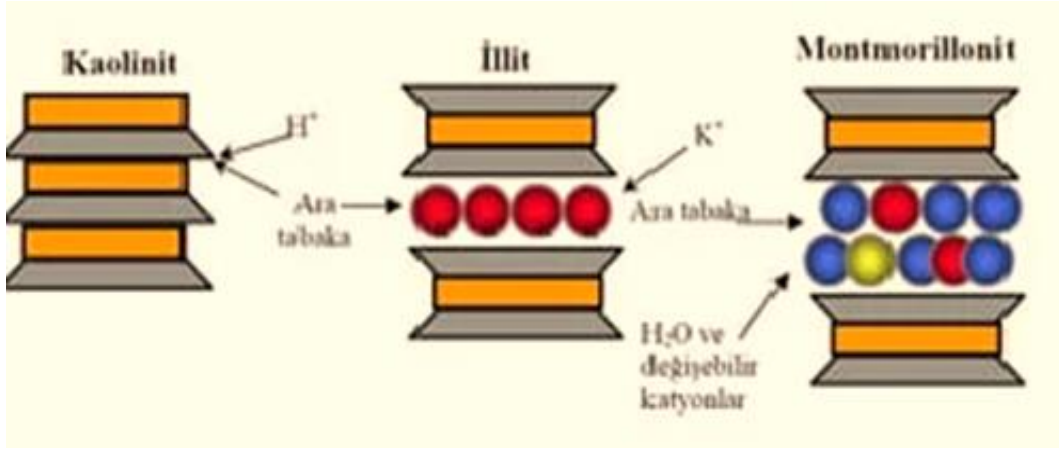
Bentonitin farklı türleri, potasyum (K), sodyum (Na), kalsiyum (Ca) ve alüminyum (Al) gibi ilgili baskın elementlerine göre bulunur. Endüstriyel amaçlar için üç ana bentonit sınıfı mevcuttur: sodyum, kalsiyum ve potasyum bentonit.

Vermikülit, iki tetrahedral tabaka arasında bir oktahedral tabakanın oluştuğu 2:1 grup kil minerallerindendir. Vermikülitlerin çoğunda dioktahedral yapı gösteren Al hakimdir. Vermikülit, ısıtıldığında önemli miktarda genleşmeye uğrayarak pul pul dökülmeye neden olan sulu fillosilikat minerali olarak bilinir ve ticari fırınlar rutin olarak bu etkiyi oluşturabilir. Vermikülit, biyotit veya flogopitin ayrışması veya hidrotermal modifikasyonu ile oluşur (Robertson 1986). Vermikülit ilk olarak 1824 yılında tanımlandı. Adını, ısıtıldığında pul pul dökülmesinden dolayı Latince “vermiculare” kelimesinden türemiştir. Vermikülit kil mineralinde, Si^{+4} yerine Al^{+3} 'nın daha fazla yer değiştirmesi nedeniyle tetrahedral tabaka oldukça negatif yüklüdür ve kil mineralinin smektit grubundan daha yüksek olan yüksek katman yük yoğunluğuna (birim formül başına 0,6-0,8 arasında) neden olur (Guynnet *et al.* 2005). Vermikülitin kimyasal formülü $(Mg, Fe^{+2}, Fe^{+3})_3(SiAl)_4O_{10} (OH)_2.4H_2O$ 'dur. Su moleküllerinin ara katmanda K^+ iyonu yerine Mg^{+2} ve diğer iyonlarla birlikte bulunması onu mikalardan farklı kılmaktadır. Bu nedenle, hem tetrahedral hem de oktahedral birimler birbirinden ayrılmak yerine sıkı bir şekilde birleştirilir ve bu da ıslanma sırasında katmanlar arası aralığın daha az genişlemesine neden olur. Vermikülitin katyon değiştirme kapasitesi (KDK) çok yüksektir (100–150 meq/100 g). Vermikülit kili, moleküler tabakalar arasında potasyum iyonlarının yerini magnezyum ve demir iyonlarının aldığı bir kil türüdür (Tong 2000).

B. Genleşmeyen kil mineralleri: Bu grup esas olarak mineral çökeltisinin ikincil formu olan mika (illit) kil mineralini içerir. Bu grup fillosilikat veya katmanlı alümino-silikatın bir örneğidir. İnce taneli Mika olarak da adlandırılan kil fraksiyonlarında muskovit ve biyotit de bulunmaktadır. İllit, hava koşulları ve hidrotermal ortamlardan oluşan muskovit ve feldispatın değiştirilmiş bir ürünü olarak kabul edilir; serisit bileşeni olarak bilinir. Yaygın olarak toprakta ve killi tortul kayaçların yanı sıra bazı düşük dereceli metamorfik kayalarda da bulunur. İllit, tetrahedral levha Vermikülitten bile daha yüksek negatif yüke sahiptir; bunun nedeni, önemli iyon izomorfik yerdeğiştirmesine sahip silisyum atomu bölgeleri yerine tetrahedral levhada %20 alüminyum atomunun bulunmasıdır. Yük eksikliği esas olarak katmanlar arası boşlukta bulunan ve katmanlar arasında köprü görevi gören K^+ iyonları tarafından dengelenir, böylece katmanların genişlemesi önlenir. Bu nedenle katmanlar arası mesafe 10 Å olarak bulunmuştur. Kimyasal formül $(K,H_3O)(Al,Mg,Fe)_2(Si,Al)_4O_{10}[(OH)_2,(H_2O)]$ şeklindedir. Adsorpsiyon kapasitesi, şişme, büzülme kapasitesi Montmorillonit ve Vermikülit'e göre daha az, Kaolin'e göre ise daha fazla ara tabakalı tabakalar mevcuttur. İllitin katyon değişim kapasitesi (KDK) smektitinkinden daha küçüktür ancak kaolininkinden daha yüksektir, tipik olarak 20-30 meq/100 g civarındadır (Do Nascimento 2021).

3. 2:1:1 Tabakalı Silikat

Klorit temel olarak bazı alüminyum atomlarına sahip demir magnezyum silikatlardan oluşan 2:1:1 silikat grubuna aittir. Vermikülit kil mineralinde olduğu gibi 2:1 katmanlardan oluşan tipik klorit kil kristali, 2:1:1 oranına yol açan magnezyumun hakim olduğu üç oktahedral tabaka ile dönüşümlü olarak kullanılır. Kloritteki tüm oktahedral konumlar, brisit tabakasındaki gibi magnezyum iyonları tarafından işgal edilmiştir (Beaufort *et al.* 2015). Kloritlerin negatif yükü smektit veya vermikülitlerden daha azdır ancak ince taneli mika ile hemen hemen aynıdır. Bu kristalin genleşmeyen yapısından sorumlu olan katmanlar arasında su adsorpsiyonu yoktur. Katmanlar arası aralık yaklaşık 14 Å'dur. Muskovit benzeri silikat tabakası ve alüminyum hidroksit tabakasına sahip olan kloritler donbassit olarak adlandırılır (Gomes and Rautureau 2021). Çoğu durumda, oktahedral katmanda bulunan alüminyum iyonlarının yerini, sudoit adı verilen magnezyum açısından zengin alüminyum dioktahedral kloritlerde olduğu gibi kısmen magnezyum iyonları alır. Dioktahedral kloritin başka bir türü, oktahedral levhalarda alüminyumun yerine lityumun geçtiği Cookeite'dir (Kohut and Warren 2002). Farklı kil mineralleri Şekil 14'te gösterilmiştir.



Şekil 14. Farklı kil mineralleri

b. Zincir Silikatlar

1. Paligorskit veya atapulgit

Paligorskit, esas olarak Amerika Birleşik Devletleri'nin güneydoğusunda bulunan bir tür killi toprakta bulunan $(\text{Mg,Al})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH}) \cdot 4(\text{H}_2\text{O})$ formülüne sahip lifli bir magnezyum alüminyum fillosilikattır. Dolgun toprak türlerinden biridir. Paligorskit'in yapısı uzatılmış silisyum-oksijen tabakalarından oluşur. Silisyum-oksijen tabakalarını oluşturan tetrahedral SiO_4 grupları uzatılmış çıta benzeri özelliklerin geliştirilebileceği şekilde yönlendirilir. Playa göllerindeki çökeltilerde, çöl topraklarındaki tuzlu çökeltilerde ve kireçli materyalde bulunan zincir silikat mineralidir. Attapulgit, bir tür paligorskit örneği mineraldir (Kumari and Mohan 2021).

2. Sepiyolit

Aynı zamanda $\text{Mg}_4\text{Si}_6\text{O}_{15}(\text{OH})_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ kimyasal formülüne sahip lifli hidratlı bir magnezyum silikat olan Lületaşı olarak da bilinir. Opak olup beyaz, gri veya krem rengindedir. Sepiyolit ve paligorskitlerin yapıları hemen hemen benzer olup, köşelerden birbirine tutturulmuş 2:1 tabakalı dar şeritlerden oluşur. Bir şerit diğerine SiO_4 tetrahedronların apikal oksijen atomlarının yönünün tersine çevrilmesiyle bağlanır; başka bir deyişle, sürekli 2:1 katmanlardan oluşan uzatılmış dikdörtgen bir kutu, en yakın kutulara uzatılmış köşe kenarlarından çevrelenir. Dolayısıyla silikat tabakalarının bulunmaması nedeniyle kutuların genişleyen kenarlarında kanallar veya tüneller oluşması, minerallerin lifli morfolojisine neden olur. Oktahedral tabaka düzensiz olduğundan, oktahedral tabakada bulunan magnezyum iyonlarının bir kısmı kenarlarda açığa çıkar ve bağlı su moleküllerini tutar. Dikdörtgen kanallarda bağlı su moleküllerine ek olarak değişken miktarlarda zeolitik/serbest su bulunur. Şeritlerin genişliğinin sepiyolitte paligorskitten daha fazla olduğu bulunmuştur ki bu da bu

zincir silikatlar arasındaki önemli bir farktır. Şeritlerin genişliği formül birimi başına oktahedral katyon pozisyonlarının sayısını tanımlar (Wada 1989).

c. Seskioksit

Seskioksit kil, şiddetli yağışlardan üretilir ve daha az çözünür demir oksit (Fe_2O_3), demir hidroksit ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) ve alüminyum hidroksit ($\text{Al}(\text{OH})_3$) bırakarak silika ve alüminanın çoğunu alumino-silis kilinden süzer. Demir ve alüminyumun seskioksitleri toprakta bulunur. Bir seskioksit, üç oksijen atomu ve iki başka elementten oluşan bir oksittir. Örneğin alüminyum oksit (Al_2O_3) bir seskioksittir. Birçok seskioksit, hem peroksit (O_2^{-2}) hem de süperoksit (O_2^-) iyonlarını içeren alkali metal seskioksitler hariç, +3 oksidasyon durumuna sahip metal atomunu ve Al_2O_3 , La_2O_3 gibi oksit iyonunu içerir; örneğin Rb_2O_3 [$(\text{Rb}^+)_4 (\text{O}_2^{-2})_2 (\text{O}^{-2})_2$] şeklinde formüle edilmiştir (Xia 2010; Zuo *et al.* 2023;). Doğası gereği yapışkan değildirler ve su varlığında şişmezler. Fosforu sıkı tutma eğiliminde oldukları için büyük miktarda fosfat tutma yetenekleri vardır, bu da onları bitkiler tarafından emilemez hale getirir. Düşük katyon değişim kapasitesi (KDK)'ne sahiptirler. Hem kristal hem de amorf formda bulunurlar. Kristalin seskioksit metal oksit veya hidroksittir, amorf seskioksit ise allofan ve imogolittir (Koji 1989).

1. İmogolit

$\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5/2\text{H}_2\text{O}$ bileşimine sahip bir alüminosilikattır. Bu mineral 1962 yılında “imogo” olarak bilinen camsı volkanik külden elde edilen toprakta keşfedildi. İmogolitin elektron-optik gözlemleri, çapları 10 ila 30 nm arasında değişen ve uzunlukları birkaç μm 'ye kadar uzayabilen pürüzsüz ve kavisli ipliksi tüplere sahip benzersiz bir morfolojik özellik ortaya koymaktadır. İmogolitin şekli silindirik olup, gibsit oktahedral tabakasının bir tarafındaki hidroksilin, gibsitin boş oktahedral katyon bölgelerinde bulunan silikon atomlarıyla bağ oluşturan protonları kaybettiği, değiştirilmiş bir gibbsit tabakasından oluşur. Böylece, silisyum atomunun etrafında bulunan üç oksijen atomu ve bir hidroksil, bir gibsit tabakasının kenarında düzlemsel bir dizi oluşturan ortosilikatlarda olduğu gibi izole edilmiş bir SiO_4 tetrahedron oluşturur. Silikon-oksijen bağları arasındaki bağ uzunluğunun alüminyum-oksijen bağlarından daha kısa olması nedeniyle tabakanın eğri şekline dönüşmesi, iç ve dış çapları sırasıyla yaklaşık 6,4 Å ve 21,4 Å olan ve tüm hidroksillerin yüzeyde açığa çıktığı tüp benzeri bir yapıyla sonuçlanır (Bahadori 2019; Kumari and Mohan 2021).

2. Allofan

Doğal olarak oluşan sulu alüminosilikat minerallerinin bir grubu olarak kabul edilir. Tamamen amorf değildirler ancak kısa mesafeli (kısmen) düzenlidirler. Allofan, alüminyum atomlarının çoğunun tetrahedral olarak koordine edildiği Si-O-Al bağlarının baskınlığı ile tanımlanır. İmogolitin aksine, alofanın morfolojisi ince, yuvarlak halka şeklindeki parçacıklardan düzensiz agregatlara kadar değişir; bu da halka şeklindeki parçacıkların içi boş küreler veya çokyüzlüler olabileceğini gösterir. Tanımlanamaz yapılarına rağmen, $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$ oranlarının çoğunlukla 1,0 ile 2,0 arasında bulunması nedeniyle kimyasal bileşimleri şaşırtıcı bir şekilde nispeten dar bir aralıkta kalmaktadır. Genel olarak alofanın $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$ oranı imogolitinkinden daha yüksektir (Childs *et al.* 1990; Jeute *et al.* 2021).

Kil minerallerinin özellikleri

Kil minerallerinin temel özellikleri aşağıdaki gibidir.

a. Plastisite: Öğütüldükten sonra kil mineraline yeterli miktarda su ilave edilirse işlenebilir ve şekil verilebilir hale getirilir. Bu özelliklerin ortaya çıkarılabilmesi için kilin su ile harmanlanması gerekir. Su dışında da kil mineraline plastisite özelliği kazandırabilecek birçok sıvı denenmiş olsa bile (alkol, aseton, amonyak vb.) bu özellik ortaya çıkarılamamıştır (Tole *et al.* 2019).

b. Kohezyon: Su ile harmanlanmış ve şişirilmiş olan kil mineralinin kurutulduğunda almış olduğu şekli muhafaza etmesine kohezyon özelliği denir. Kohezyon da plastisite gibi su ile elde edilmiş bir özelliktir. Su dışında hiçbir sıvı ile elde edilememiştir (Murray 1991).

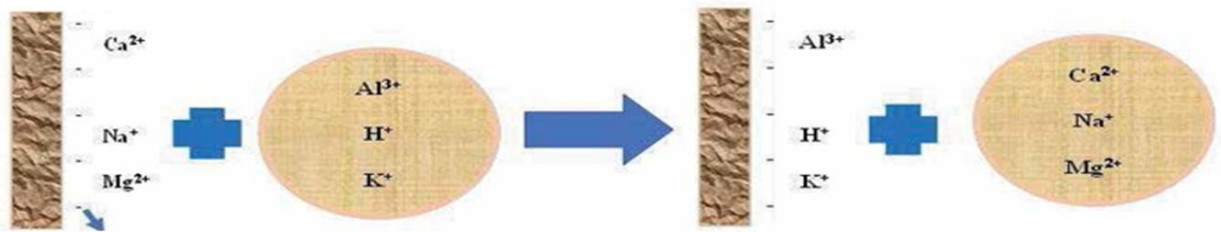
c. Renk: Organik maddeler ve özellikle metal oksitleri içeriğine göre killeri çeşitli renkleri almaktadır. Kaolin olarak adlandırılan saf killeri beyaz renkte bulunmaktadır. Organik maddelerin fazlalığı kile menekşe rengini kazandırmakla birlikte limonit (kahverengi doğal hidratlı demir oksit) bulunması halinde rengi esmerdir, demir peroksit bulunması halinde rengi kırmızıdır, mangan dioksit bulunması halinde rengi siyahtır. Yeşil, sarı vb. renklerde (yaygın olarak) killeri de mevcuttur (Murray 2000; Bolto *et al.* 2001).

d. Büzüşme (Rötre): Su ile şişirilen kil hamurunun kuruma esnasında suyun uzaklaşmasıyla hacmi küçülür. Büzüşme olarak adlandırılan bu olay kilin plastisite özelliğine bağlı olarak şişirilme sırasında da ortaya çıkmaktadır (Wang *et al.* 2023).

e. Katyon değişim kapasitesi: Kil minerallerinin belirli katyonları/anyonları adsorbe edebilmeleri ve yapı birimi dışında tutulabilmeleri, mineral yapılarındaki pozitif veya negatif yük eksikliğine bağlıdır. Bu adsorplanan iyonların değişimi diğer iyonlarla gerçekleşir. Farklı

reaksiyona giren iyonlar arasındaki niceliksel ilişki, değişim reaksiyonunu basit adsorpsiyondan tamamen farklı kılar. Katyon değişim kapasitesi (KDK), toprak parçacıklarının yüzeyinde tutulan katyon sayısının ölçümüdür (Schoonheydt and Johnston 2011; Heinz 2012). Belirli bir pH'ta diğer katyonlarla değiş tokuş için mevcut olan katyonların miktarı olarak tanımlanır ve genellikle milieşdeğer/100 gram kuru kil cinsinden ifade edilir. Toprak partikülünün yüzeyinde bulunan negatif yüklü iyonlar, pozitif yüklü iyonlara bağlanır ancak bunların çevredeki toprak suyunda diğer pozitif yüklü partiküllerle değişimine izin verir ve toprağın kimyasının değişmesine neden olur (Verbung and Baveye 1994; Petry and Das 2001). KDK'ni belirlemek için kullanılan yöntem esas olarak amonyum, Na, K, Co (III) heksamın kompleksi, Ba ve Cu (II) etilen diamin kompleksi gibi katyonik türlerle katyonların tam değişimini içerir. KDK'ni belirlemeye yönelik dolaylı yöntem esas olarak kil minerallerinde doğal olarak oluşan katyonik türlerin alkilamonyum gibi organik katyonlarla değişimini içerir. KDK'nin belirlenmesinde kullanılan yöntemle bağlı olarak, eğer değişen katyonlar fazla miktarda mevcutsa, bir sonraki aşamada uzaklaştırılır ve kil yüzeyinde kalan katyonlar belirlenir (Chabra *et al.* 1975; Cohen and Yariv 1984; Al-Ani and Sarapää 2008). Ag tiyoüre kompleksi, Co (III) heksamın kompleksi, Cu (II) etilendiamin kompleksi, amonyum asetat ve sodyum asetat gibi diğer bazı kompleksler, kil minerallerinin bu iyonlara afinitesinin yüksek olması nedeniyle KDK'ni doğrudan belirleyebilir (Bergaya and Vayer 1997; Aran *et al.* 2008; Kumari and Mohan 2021). KDK'nin belirlenmesinde kullanılan potansiyometrik titrasyon, yüzey gerilimi ölçümü gibi başka teknikler de vardır. Potansiyometrik titrasyon, bentonit, Na-Montmorillonit ve İllit içeren farklı kil mineralleri için kullanılırken, montmorillonit, kaolin ve İllit için yüzey gerilimi ölçümü kullanılır (Burrafato and Miano 1993; Ghosh 1997).

Kil ya da organik kolloid



Şekil 15. Kil minerallerinde katyon değişiminin gösterimi

f. Şişme kapasitesi: Kuru kil minerallerinin kontrollü bir ortamda suyu adsorbe etmesine izin verilirse, ara katman boşluğuna az çok farklı katman formlarında su eklenir ve ara katman alanının şişmesine veya genişlemesine neden olur. Kil minerallerinin katmanlar arası boşluğunun şişmesi, parçacık etkileşimi ile ilişkili hidrasyon enerjiden kaynaklanmaktadır.

Şişen kil, su içeriğindeki değişime bağlı olarak büyük hacim değişimine eğilimlidir (Karpinski and Szkodo 2015; Rahromostaqim and Sahimi 2018).

g. Spesifik yüzey alanı (SYA): Spesifik yüzey alanı (SYA), kuru toprağın birim kütlesi (veya hacmi) başına toprak parçacıklarının yüzey alanı olarak tanımlanır. Birimi m^2/g veya m^2/m^3 'tür. Kil minerallerinin yüzey alanı temel olarak kil minerallerinde bulunan bileşenlerin parçacık boyutuna ve şekline bağlıdır. Parçacık boyutu küçüldükçe spesifik yüzey alanı artar. Bu ifade, simektit, vermikülit, sepiyolit ve paligorskit yüzey alanının büyük bir kısmına sahip olan kil mineralleri için geçerlidir. Spesifik yüzey alanı farklı kil mineralleri için farklıdır. Montmorillonit ve Vermikülit gibi genişleyen kil mineralleri $810 m^2/g$ 'a kadar yüksek spesifik yüzey alanına sahipken, kaolin gibi genleşmeyen kil mineralleri $10-70 m^2/g$ 'a kadar spesifik yüzey alanına sahiptir (Gunal and Ransom 2006; Velde *et al.* 2008). Spesifik yüzey alanı, asit aktivasyonunun esas alındığı inorganik asitlerle muamele ile artırılabilir.

Maliyetinin çok düşük olması, çevre dostu olması, kolay bulunabilmesi ve toksik olmaması nedeniyle kil mineralleri sürekli olarak araştırılmıştır. Kil mineralleri o kadar yaygındır ki, dünyada kil minerallerinden herhangi birinin bulunmadığı ülke hemen hemen yoktur. Doğada kil mineralleri belirli fiziksel ve kimyasal özelliklerde bulunur ve bu kil mineralleri bilimsel araştırmalardan, endüstriye kadar farklı birçok alanlarda önemli bir rol oynamaktadır. Kil mineralleri, esasen, tabakalar arasında farklı mesafelerin olduğu, gözenekli tabaka benzeri yapıya sahip, kaya oluşturu mineralerin bir sınıfıdır. Matris malzemesinin ve gözenek sıvısının elektriksel iletkenliğinin birleşimi, gözenekli malzemenin elektriksel iletkenliğidir (mS/m). Kil malzemelerinin negatif yüklü yüzeyi tarafından olası yüklü iyonların sayısı olan katyon değişim kapasitesi, tabaka sayısına ve bu yapılarda bulunan katyonların tür ve miktarına bağlıdır (Ugochukwu 2019). Bu nedenle kil minerallerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri önemli ölçüde tabaka yapılarına, katyon ve anyon değişim kapasitelerine ve adsorpsiyon kapasitelerine bağlıdır ve bu da onların farklı uygulamalardaki önemini belirler (Nadziakiewicz *et al.* 2019).

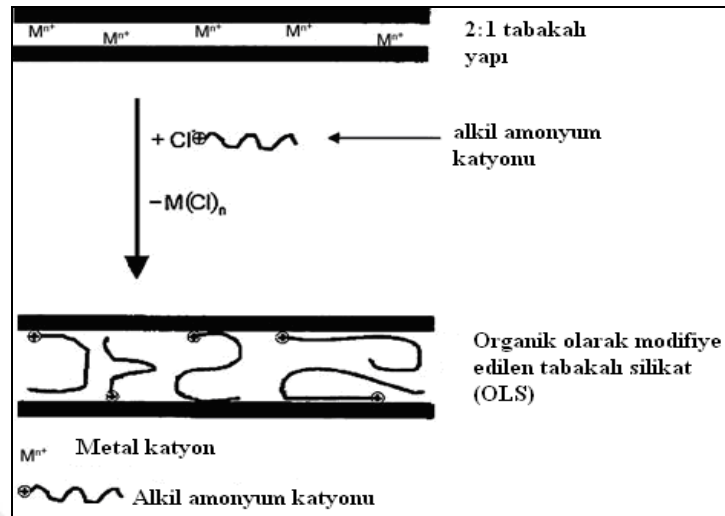
Organokil

Killer genel olarak doğalarından dolayı hidrofilik yapıya sahiptirler. Organik yapılı polimer molekülleriyle uyumlu olması ve endüstri alanında kullanılabilmeleri için kullanılmaya başlamadan önce kil minerallerine yüzey modifikasyonu yapılmalıdır (Heinz 2012; Ismadji *et al.* 2015). Killer farklı organik maddeler ile etkileştiklerinde değişik özelliklere sahip organokilleri oluşturulmaktadır. Bu etkileşim, killerin insanlar tarafından ilk kullanılmaya başladıkları zamandan beri bilinmektedir. Bu etkileşimler, ilk kez Çin'de M.Ö. 185 yıllarında yapılmaya başlanan porselenlerin ince cidarlı olması için ürenin kullanılması ile başlamıştır.

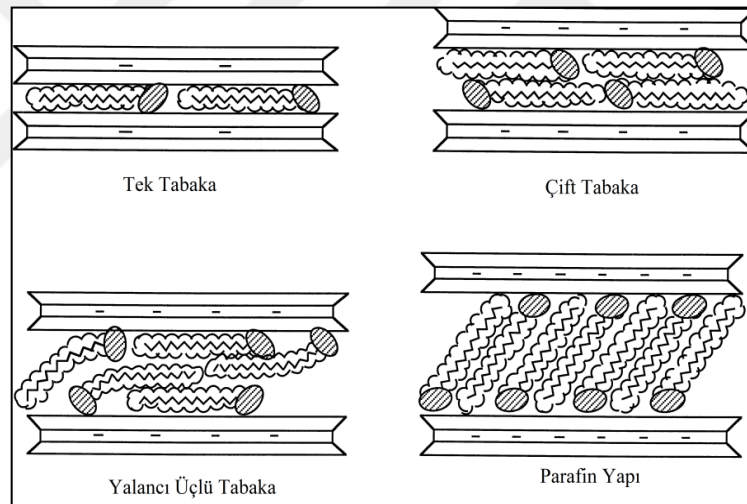
Killer ile organik maddelerin etkileşimleriyle ilgili çalışmalar ise kil mineral yapılarının incelenmesinin ardından 1900'li yıllarda yapılmıştır (Six *et al.* 2004). Organik katyonlar ile killerin yüzeylerinin istenildiği gibi değiştirilebilmesi için çalışmalar halen devam etmektedir (Awad *et al.* 2019; Baysal 2010). Kil minerallerinin modifikasyonu için kuaterner amonyum ve fosfonyum iyonları gibi organik katyonlar kullanılabilir. Tabakalar arasındaki inorganik katyonlar ile organik onyum tuzlarının değişmesiyle killer modifiye edilebilmektedir. Organik olarak modifiye etme, kil tabakaları arasında bulunan mesafenin (d) artmasına sebep olur ve böylelikle d mesafesi belirli bir uzunluğa gelene kadar (2 nm üzerine çıkana kadar) artabilmektedir. Organik modifikasyon, polimerlerin difüze olmasını veya tabakalar arasındaki mesafenin (d) aralanmasını kolaylaştırmaktadır (Singla *et al.* 2012; Alves *et al.* 2016). Tabakalı yapıları silikatlarda bulunan yüksek negatif yüke sahip olma ve iyon değiştirebilme kabiliyetleri, katyon değişim kapasitesi (KDK) ile belirlenebilmektedir (Galamboş *et al.* 2012). Bu özellik, farklı tabakalardaki killer için eş biçimli (izomorfik olarak) yerdeğiştirme ve kili meydana getiren toprağın doğal yapısının içeriğine göre değişir. Tabakaların yükünün, belli bölgelerde durağan bir değeri olmadığından farklı tabakalar için bu değer de farklı olmaktadır. Bu değer, kristalin tamamı için ortalama olarak dikkate alınan bir değerdir. Katyonların dengesini sağlayan yükün çok küçük bir parçasının bile kristalin dış yüzey bölgesinde bulunması halinde ise bu değişen katyonların çoğunun büyük oranda kil galerilerinin içerisinde yer aldığı bilinmektedir (Bergaya *et al.* 2006; Meetei *et al.* 2020).

Kil yapısının organik olarak modifiye edilmesinin şematik olarak gösterimi Şekil 16'da verilmiştir. Alkil amonyum iyonları ile tabakalar arasındaki iyonların kolaylıkla değişebilir olmaları onları en bilinen modifiye ediciler olarak kullanılmalarını sağlamaktadır. Kilin tabakalarındaki yük yoğunluğunun durumuna göre bu iyonlar kil tabakalarının arasında bulunan farklı yapılara uyum sağlayabilirler (Lagaly 1986; Azeez 2013; Tournassat *et al.* 2015). Bu iyonlar, tabakaların arasındaki bölgelerde tekli tabaka, ikili tabaka, yalancı üçlü tabaka veya parafinik tabaka yapısında olabilmektedir. Bu yönelmeler, Şekil 17'de şematik olarak gösterilmektedir. Yükün yoğunluğu ve zincirin uzunluğu bu yönelme şekillerini belirlemektedir. Yük yoğunluğu düşük olduğunda kısa olan zincirli katyonlar tek sıra halinde dizilmektedirler. Eğer alkil amonyum zincirleri yüke göre daha büyük veya belirli sayıdaki zincirlerde yük yoğunluğundan daha fazla ise katyonlar iki katlı biçimde dizilmektedirler. Yük yoğunluğunun daha fazla olması durumunda psödo (yalancı) üçlü, yük yoğunluğunun aşırı yoğun olması halinde parafinik yapıyı yönelim gerçekleştirmektedir (Pavlidou and Papaspyrides 2008; Baysal 2010; Heinz *et al.* 2012; Hayes, 2014). Silika tabakalarının arasındaki elektrostatik etkileşimlerden dolayı alkil amonyum iyonlarının sayısı azalmaktadır. Bu durum

polimerlerin difüzyonunu kolaylaştırmaktadır. Kil tabakaları arasındaki d mesafesi genel olarak yüzey aktif maddelerin zincirlerinin uzunluğuna göre açılmaktadır (Azeez 2013).



Şekil 16. Tabakalı silikatlar ile alkilamonyum tuzu arasında gerçekleşen katyon değişim prosesi (Kiliaris and Papaspyrides 2010).



Şekil 17. Alkil amonyum katyonlarının tabakalar arası bölgede yönelme şekilleri (Lagaly 1986; Le Baron 1999).

Organokillerin sentezi

Organokil sentezlenmesi için, organik bileşikler ile kil minerallerinin yaptığı reaksiyonların kinetiğinin önemli bir rolü vardır. Polar moleküller smektit ve vermikülit killerinin tabakaları arasında bulunan su molekülleri ile yer değiştirmektedir (Yariv 2002; Theng 2024). Organik yapıdaki nötr bileşikler ise tabakalar arasında bulunan katyonlar ile bir araya gelerek karmaşık (kompleks) bir yapı oluşturmaktadırlar. Smektit killerde ise nötr yapıda olan molekül yapıların adsorpsiyonu için farklı kimyasal etkileşimler (hidrojen bağlanması, iyon-dipol etkileşimi ve van der Waals etkileşimleri gibi) gerçekleşmektedir. Tabakaların arasındaki katyonlar ile organik yapıdaki katyonların farklı türleri yer değiştirebilir (Lagaly et

al. 2006). Örneğin, kil minerallerinin yüzeylerini suyu sevmeyen (hidrofobik) hale getirmek için reaktif yüzey gruplarıyla organik yapılı türler arasında bir etkileşim olayının başlangıcı organokillerin oluşumu için başlangıç adımıdır.

Organokillerin hazırlanması genel olarak katı hal etkileşimi ve katyon değişimi ile yapılmaktadır.

a. Katı hal etkileşimi

Çözücü kullanılmadan organik moleküller, bu proses sayesinde iyice kurutulan kil minerallerinin içinde interkale olabilirler (Williams-Daryn and Thomas 2002; Bergaya *et al.* 2011). Bu proseste çözücü madde kullanmamak çevreyi kirletmeme açısından çok önemlidir ve bundan dolayı sanayi sektöründe de tercih edilmektedir. Kil tanecikleri ve amonyum katyonları arasında gerçekleşen katı hal etkileşimi reaksiyonları ilk olarak Ogawa (1990) tarafından araştırılmıştır. Breakwell ve arkadaşları (1995) ise, kil ve kuaterner alkil amonyum tuzlarının reaksiyonunu içeren katı hal prosesini, yüksek hızlı bir mikser ile ve 60°C’de hazırlamıştır. X ışını difraksiyonu (XRD) kullanılarak kuarterner alkilamonyum tuzlarının kil tabakaları içine yaklaşık olarak %68-%78 oranında adsorplanabildiği sonucuna ulaşılmıştır (Nagendrappa 2002; De Paiva *et al.* 2008; Gürses *et al.* 2011).

b. Katyon Değişimi

Bu proses, kil minerali tabakalarının arasındaki katyonların sulu çözeltideki kuaterner alkil amonyum katyonlarıyla yer değişimi durumlarını kapsamaktadır. Genel olarak birinci, ikinci, üçüncü ya da kurterner alkil amonyum veya alkil fosfonyum katyonlarının bulunduğu surfaktantlar ile katyon değişimi yapılabilmektedir. Bu katyonlar sayesinde inorganik silikatlerin yüzey enerjisi düşürülüp, polimer matriksin ıslatma karakteristiği değiştirilebilmektedir. Bu durum tabakalar arasında geniş bir boşluk oluşturmakta ve polimerik matriks ile etkileşime girebilen fonksiyonel grupların sayısını artırmaktadır (Ray and Okamoto 2003; Tushar and Faiza 2006; İşçi 2007; De Paiva *et al.* 2008).

Organokillerin kullanım alanları

Kil minerallerinin yüzey modifikasyonları, yeni malzemelerin ve yeni uygulamaların yaratılmasına olanak sağlaması nedeniyle ilgi görmüştür. Killerin yüzey modifikasyonunun ana odağı malzeme bilimidir. Çünkü organokiller polimer nanokompozitlerin geliştirilmesi için gereklidir. Nanokompozitler, nanoteknolojinin en gelişmiş alanlarından birini oluşturmaktadır. Killeri ve kil minerallerini değiştirmek için adsorpsiyon, inorganik katyonlar ve organik katyonlarla iyon değişimi, inorganik ve organik anyonların (esas olarak kenarlarda)

bağlanması, organik bileşiklerin aşılması, asitlerle reaksiyon gibi çeşitli yollar kullanılabilir. (De Paiva *et al.* 2008; Bergaya *et al.* 2011).

Organokiller çevre alanındaki sorbent sistemleri de dahil olmak üzere çok sayıda uygulamada kullanılabilir. Bu malzemeler çok sayıda organik bileşik, özellikle hidrofobik kimyasallar için ilginç adsorpsiyon özellikleri sergiler. İyonik olmayan organokiller, farklı doğadaki çok sayıda kimyasal tutma yetenekleriyle çok yönlü bir sorbent malzeme olarak dikkat çeker; bununla birlikte, hidrofobik ve organik katyonlar için sırasıyla katyonik organokil ve işlenmemiş kil mineralleri ile benzer adsorpsiyon derecesine ulaşmazlar. Çevre uygulamalarında potansiyel ilgi gösterilmesine rağmen, organokillerin kullanımının, iyonik güç gibi bazı deneysel koşulların şimdiye kadar araştırılmadığı ve adsorpsiyon verimliliğini azaltabileceği görülmektedir (Guégan 2019).

Polimer/Kil Nanokompozitlerin Yapısı

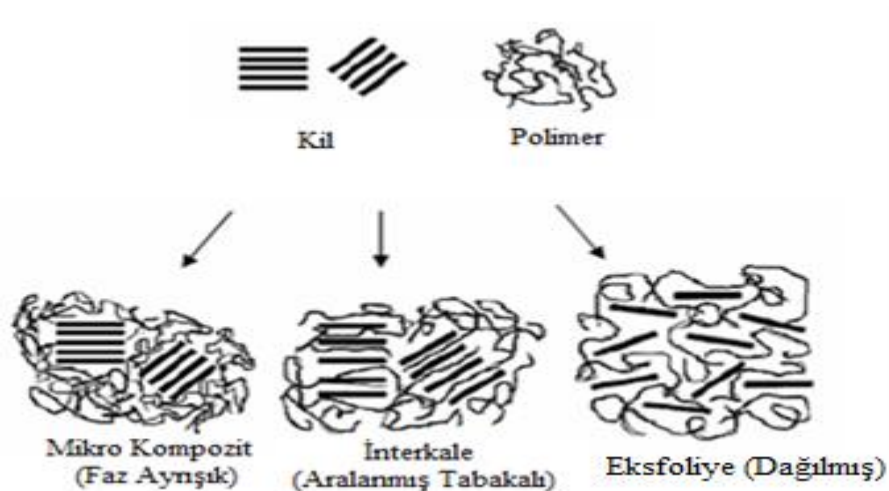
Polimer kil nanokompozitleri, sırasıyla monomer ve kil süspansiyonunu içeren iki sulu çözeltinin doğrudan karıştırılması ve ardından termal veya ışık kaynakları tarafından indüklenen polimerizasyon veya kimyasal oksidanların eklenmesiyle yapılabilir (LeBaron *et al.* 1999; Thostenson and Chou 2005).

Polimerik malzemelerin havacılık, otomotiv, tekstil ve elektronik dahil olmak üzere birçok farklı alanda uygulamaları vardır. Polimer bazlı nanokompozitler hem endüstride hem de akademik dünyada özel ilgi görmüştür (Balta *et al.* 2001; Bernet *et al.* 2002; Clifford *et al.* 2006; Jansson *et al.* 2007). Katmanlı silikatlar en yaygın olarak incelenen nano dolgular arasındadır. Genel olarak nanokompozitlerin özelliklerinin geleneksel makro ve mikro malzemelere göre iyileştirildiği düşünülmektedir (Giannelis 1996; Thostenson *et al.* 2001; Chen *et al.* 2003).

Kompozitler, parçacık yüzeyine yakın polimer matrisinin yapısının ve dinamiğinin modifikasyonu ile ilgilidir. Nanopartiküllerin çok geniş spesifik yüzey alanı nedeniyle, polimerin bu fraksiyonu, ağırlıkça %1,0-8,0 olacak kadar düşük dolgu içeriklerinde bile yığın özelliklerine önemli ölçüde katkıda bulunabilir. Gerçekten de fazlararası özellikleri kontrol ederek elde edilen nanokompozitler malzemenin mekanik özelliklerini uyarlamanın mümkün olduğu gösterilmiştir (Wu *et al.* 2002). Öte yandan, dolgu maddesi mikron boyutunda parçacıklardan oluştuğunda, mekanik özelliklerde önemli bir iyileşme elde etmek için yüksek derecede bir yükleme (genellikle hacimce %20'den fazla) gerekir ve bu, işlenebilirliği, görünümü ve yoğunluğu tehlikeye atabilir.

Nanopartiküller, farklı uygulamalara yönelik potansiyellerini araştırmak amacıyla bir dizi polimer matrisle birleştirilmiştir. Bunların geleneksel poliüretan termoset teknolojisiyle uyumlulukları, elde edilen nanokompozitlerin reolojik ve mekanik özelliklerindeki değişiklikler incelenmiştir (Rodlert *et al.* 2004'a; Plummer *et al.* 2005; Houphouët-Boigny *et al.* 2008). Oksijen bariyeri özelliklerini geliştirmek için hibrit organik/inorganik nanomateriyallerin kullanımı da incelenmiştir (Singh *et al.* 2007). Nanodoldurucuların kullanımına ilişkin diğer birçok çalışma literatürde bulunabilir. Örneğin, ABD Ordusu araştırma laboratuvarı polikarbonat/katmanlı silikat nanokompozitlerinin balistik darbe dayanımını incelemiştir (Hsieh 2001). Naylon 6 / kil nanokompozitleri Toyota Şirketi araştırmacıları tarafından kullanılmıştır. Bu şirket triger kayışı kapakları üretmektedir ve bu ikincil malzemeler aynı zamanda Mitsubishi motorlarının kapaklarında da kullanılmaktadır (Gao 2004). Farklı matrisler için hazırlama tekniklerinin ve nanopartiküllerle elde edilen özellik iyileştirmelerinin incelemesi de yapılmıştır (Alexandre and Dubois 2000). Esas olarak nanodolgu maddelerinin viskoelastisite, kristallik ve yoğunluk üzerindeki etkileri incelenmiştir (Jordan *et al.* 2005). Polimer bazlı nanokompozitlerin endüstriyel açıdan işlenmesi, üretimi ve uygulamalarına ilişkin kapsamlı incelemeler yapılmıştır (Hussain *et al.* 2006).

Bileşenlerin doğasına (polimer matriksteki dolgu maddesi olarak kullanılan kil ve organik surfaktant) ve reaksiyon koşullarına bağlı olarak kil tanecikleri polimerik matrikste: faz-ayrışık (mikro-kompozit) yapı, interkale (aralanmış tabakalı) yapı ve eksfoliye (dağılmış) yapı olmak üzere üç farklı şekilde dağılmaktadır (Kumar *et al.* 2009; Kiliaris and Papaspyrides 2010; Judah 2019). Kil tabakalarının dağılımına ve boyutuna göre gözlenen bu yapıların şematik gösterimi Şekil 18'de verilmiştir. Ayrıca eksfoliye ve interkale yapıların birlikte gözlemlendiği karışık yapı da bulunmaktadır.



Şekil 18. Polimer/kil nanokompozitlerinin yapısı (Kiliaris and Papaspyrides 2010).

Mikro-Kompozit (Faz Ayrışık) yapı

Geleneksel kompozitler, herhangi bir işleme tabi tutulmamış inorganik kil ile polimer etkileştiği zaman kil tabakalarının arasında polimerin difüze olamadığı ve kil taneciklerinin topak topak olduğu yapıdır. Polimer, kilin tabakalarının içine giremez. Bu durumda da kil, polimer matriks içinde agregatlar halinde dispers olmaktadır. Organik ve inorganik bileşenler arasındaki zayıf etkileşimler sonucunda oluşan yapıların mekanik performansları düşüktür. Üstelik bu yapılar interkale ve eksfoliye yapılara göre de daha fazla kil içermektedirler (Olad *et al.* 2011).

Aralanmış tabakalı (interkale) yapı

Uzun polimer zincirlerinin silikat tabakalarının arasındaki bazal boşluğa yerleştiği zaman oluşan yapılardır. Tabakalar arası mesafenin artmasıyla ve polimerik ve inorganik tabakaların arka arkaya dizilmesiyle oluşan çok tabakalı düzenli bir yapıdır (Lim and Park 2001; Tjong 2006; Mao *et al.* 2008). Interkale yapıdaki nanokompozitler, tabakalar arası mesafesinin 20 ila 30 Å arasında olduğu ve polimer-kil tabakalarının düzgün olarak dizildiği düzenli çoklu yapılardır. Bu kompozitler, özellikleri bakımından seramik malzemelere benzetilebilmektedir (Utracki 2004; Alateyah *et al.* 2013).

Pul pul dağılmış tabakalı (Eksfoliye) yapı

Kil tabakalarının birbirinden uzaklaştığı ve bağımsız olarak polimer matriksinin içinde sürekli dispers olduğu zaman elde edilen nanokompozitler eksfoliye yapıları nanokompozitlerdir. Bu yapıda polimerler sayesinde kil tabakalarının arası daha fazla ayrılarak 80-100 Å veya daha fazla olduğu belirlenmiştir (de Oliveira and Beatrice, 2018; Zhu *et al.* 2019). Tabakalar arası mesafedeki genişlemenin miktarı, tıpkı interkale nanokompozitlerinde oluşan genişme gibi polimerin zincir uzunluğu ile ilişkilendirilebilir (Ray and Okamoto 2003; Chen 2004).

Eksfoliye nanokompozitler polimer-kil ara yüzey etkileşimlerinin yüksek olduğu yapılardır. Genellikle eksfoliye nanokompozitlerdeki kil miktarı, interkale yapıları nanokompozitlere göre çok daha az miktarlardadır. Aynı oranda kil içeren nanokompozitler karşılaştırıldığında, fiziksel özelliklerindeki iyileşmelerin interkale nanokompozitlerde eksfoliye nanokompozitlere göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bundan dolayı, diğer nanokompozit örneklerinin eldesinden eksfoliye yapıları nanokompozitlerin eldesi daha çok istenilen bir durumdur (Lee and Kim 2004; Hosseinabadi *et al.* 2016).

Karışık yapı

Kil tabakalarından belli bir kısmının polimer içinde tamamen eksfoliye (dağılmış) halde olduğu bir kısmının ise polimerlerin zincirlerinin tabakalarının aralarına difüzyonu ile genişlemiş ancak kilin düzgün yapısının korunduğu yapılardır. Bu nedenle, eriyik proseslerle hazırlanmış polimer/kil nanokompozitlerde en çok gözlemlenen morfolojik yapı tipidir (Keledi and Pukánszky 2012).

Polimer/Kil Nanokompozitlerinin Sentezi

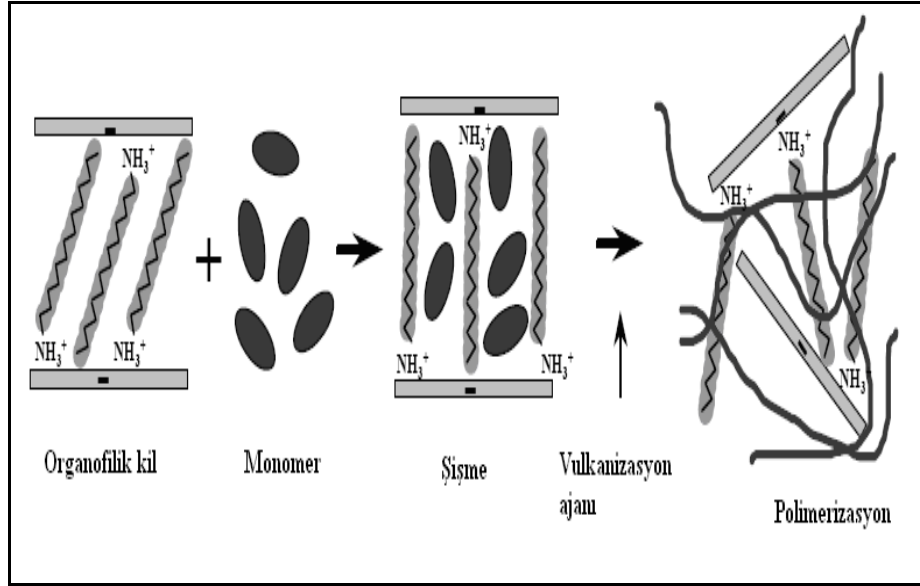
Polimer/kil nanokompozitlerini elde etmek için üç ana teknik kullanılmaktadır. Bu teknikler başlangıç malzemesi ve hazırlanma şekillerine göre farklılık gösterir. Bunlar; eş-zamanlı (in-situ) polimerizasyon yöntemi, çözültiden harmanlama yöntemi ve eriyik harmanlama yöntemidir. Bu teknikler aşağıdaki bölümlerde anlatılacaktır.

In-situ (Eş-zamanlı) polimerizasyon

Bu yaklaşımda, değiştirilmiş bir silikat sıvı monomer içinde şişirilir ve daha sonra polimerizasyon başlatılır (Ogata *et al.* 1997; Beron and Wang 1999; Rehab ve Salahuddin 2005). Bu, termoset polimer kil nanokompozitlerinin hazırlanması için özellikle uygun bir yöntemdir ancak aynı zamanda termoplastikler için de kullanılmıştır (Usuki *et al.* 1993; Lan *et al.* 1995; Tseng *et al.* 2002; Xie *et al.* 2003; Li *et al.* 2003). Yöntemin başarısı genellikle yüzeyi değiştirilmiş kilin reaksiyon sırasında polimer zincirlerine bağlanmasını sağlayan bağlanma etkinliğine bağlıdır. Literatürde bu uygulamanın pek çok örneği bulunmaktadır Toyota araştırmacıları tarafından araştırılan ilk sistem naylon 6 ardından polistiren (PS) polimetilmetakrilat (PMMA), polietilen (PE) ve polipropilendir (PP) (Usuki *et al.* 1993; Kurokawa *et al.* 1997; Doh and Cho 1998; Li *et al.* 2003; Tseng *et al.* 2002; Xie *et al.* 2003).

In-situ polimerizasyonun gelişmesi, stirenin kil tabakalarının yüzeyinden nitroksit aracılığı ile polimerizasyonudur. Bu, montmorillonit kili (MMT) ve ayrıca laponit için kullanılmıştır (Weimer *et al.* 1999; Konn *et al.* 2007). Bu durumda, kil galerilerinde kontrollü serbest radikal polimerizasyonu gerçekleşir ve nihai polimer molekül ağırlığı üzerinde sıkı kontrol avantajı sağlanır. Polimer/kil nanokompozitlerinin yerinde üretiminin ana dezavantajı, yalnızca sınırlı miktarda kilin dahil edilebilmesidir. Büyük miktarda kil, matris zincirleri için çok sayıda çekirdeklenme bölgesi anlamına gelir ve bu da düşük molar kütlelere yol açar (Loyens *et al.* 2005; Abedi and Abdouss 2014).

Eksfoliye nanokompozitlerinin hazırlanmasında sıklıkla in-situ polimerizasyon yöntemi kullanılmaktadır.



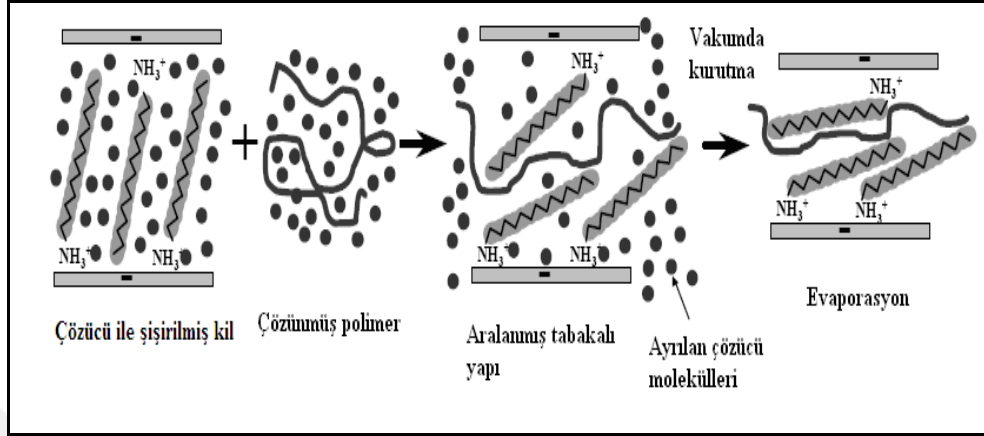
Şekil 19. İn-situ polimerizasyon yönteminin şematik gösterimi (Gürses *et al.* 2011).

Çözeltide harmanlama (İnterkalasyon)

Çözeltide harmanlamada, uygun şekilde değiştirilmiş bir kil, polimer matrisi ile birlikte bir çözücü içinde şişirilir. Kil yığınları su, aseton, kloroform veya tolüen gibi ortamlarda dağıtılabilir ve polimer, delamine edilmiş tabakalar üzerine adsorbe edilir. Çözücüyü buharlaştırarak sistem kompoziti üretmek için yeniden düzenleme yapar (Lee and Jang 1998). Örnekler, sudaki polivinil alkol (PVA), tolüendeki PS ve PMMA ve kloroformdaki polietilen glikol (PEG) bazlı nanokompozitlerdir (Strawhecker and Manias 2000; Lee *et al.* 2002; Hou and Schmidt-Rohr 2003). Çözelti harmanlama uygulamasının bir örneği, MMT tabakalarının su içinde aşırı dallanmış polimerler kullanılarak dağıtılmasıdır. Dallanmış polimerler, MMT levhacıkları ile etkileşime girebilen ve bunların nihai kompozit içindeki dağılımını stabilize edebilen yüksek yoğunlukta hidrofilik uç gruplar içerir. Bu teknik kullanılarak ağırlıkça %20'ye kadar pul pul dökülmüş MMT içeren MMT/ dallanmış polimer karışımlarının hazırlanmasının mümkün olduğu gösterilmiştir. MMT/ dallanmış polimer karışımları daha sonra yüksek düzeyde pul pul dökülmüş poliüretan nanokompozitler üretmek için bir organik solvent ve sertleştirici ile daha fazla işlenebilir. Bununla birlikte, çözelti teknikleriyle iyi bir pul pul dökülme elde edilse de gerekli olan büyük miktarda çözücü nedeniyle genellikle daha geniş bir ticari ilgi alanı olarak kabul edilmezler, bu da onu ucuz ve çevre dostu yapmaz. Ana zorluk, kilin kurutma sırasında agregat oluşturma yönündeki güçlü eğiliminin üstesinden gelmektir; ancak bu, çözeltinin yoğun şekilde karıştırılması ve/veya sonikasyonuyla azaltılabilir veya önlenir (Plummer *et al.* 2002; Rodlert *et al.* 2004a).

Polimerlerin veya ön-polimerlerin çözüldüğü ve silikat tabakalarının şiştiği çözücü bir sistemle oluşmaktadır. Tabakalı silikatlar önce uygun bir çözücüde (su, kloroform, tolüen gibi)

şışırilmektedir. Polimerler ve tabakalı silikatler karıştırıldığında zaman polimer zincirleri interkale olmakta ve silikat tabakaları arasında bulunan çözücünün yerine polimer çözeltisi geçmektedir. Çözücünün uzaklaştırılmasıyla da kompozit elde edilmektedir (Şekil 20) (Ray and Okamoto 2003; Md. Akil *et al.* 2016).

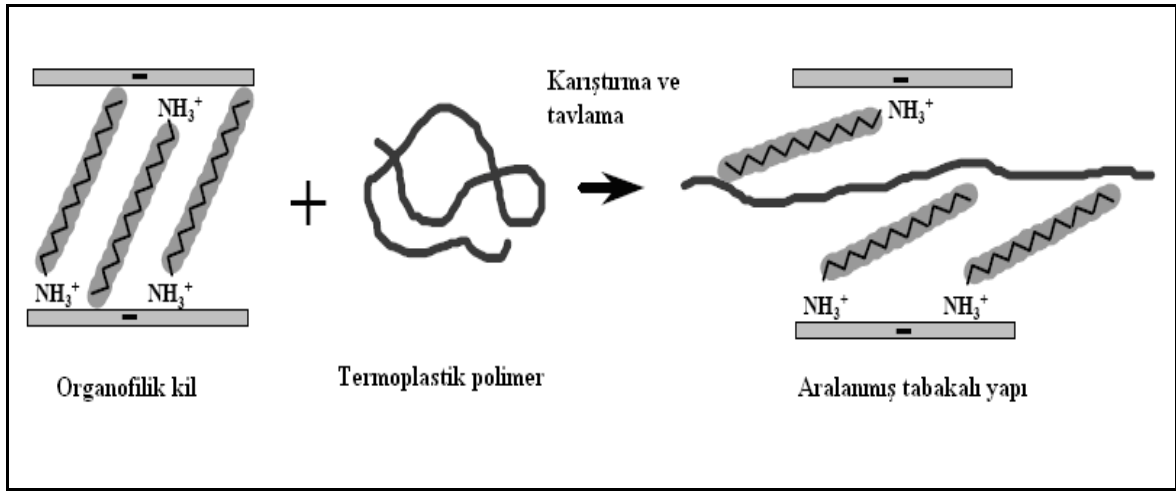


Şekil 20. Çözeltide harmanlama yönteminin şematik gösterimi (Gürses *et al.* 2011).

Eriyik harmanlama

Eriyik harmanlamada kil, erimiş haldeki polimer matris ile ekstrüzyon yoluyla ve mekanik olarak birleştirilir. Esas olarak termoplastikler için kullanılır. Eriyik harmanlama nispeten polar polimerlerde (örneğin Naylonlar) pul pul dökülmüş yapılar sağlayabilir, ancak kili Polistiren (PS), Polietilen (PE) veya Polipropilen (PP) gibi apolar malzemelerde dağıtmak daha zordur. Genel olarak karıştırma süresi ne kadar uzun olursa kil dağılımı da o kadar iyi olur. Uzun karıştırma sürelerinin bir dezavantajı, vidalı ekstruder odasındaki yüksek kesme kuvvetleri ve yüksek sıcaklıklar nedeniyle polimer zincirlerinin bozulmaya maruz kalabilmesidir. Yüksek viskozitesi nedeniyle nispeten yüksek kil içeriklerinde (ağırlıkça %5'ten fazla) mekanik karıştırma da zordur (Vaia *et al.* 1996; Dennis *et al.* 2001; Meincke *et al.* 2003; Rehab and Salahuddin 2005).

Eriyik harmanlama yöntemi, eriyik durumdaki polimer matriks ile kilin karıştırılmasından ibarettir. Polimer ile tabaka yüzeyleri arasında yeterli bir etkileşim olması durumunda, polimer kil tabakaları arasına difüze olmakta ve böylece ya interkale ya da eksfoliye nanokompozitler oluşmaktadır (Şekil 21). Naylon 6, naylon 66, polietilen tetraflat (PET) gibi poliamid esaslı kompozitlerin hazırlanmasında bu yöntem tercih edilmektedir. Diğer yöntemlere nazaran bu yöntem daha ekonomik ve daha basittir. Bu yöntemin injeksiyon kalıplama ve çift vidalı ekstrüzyon gibi hızlı proseslere adaptasyonu sayesinde nihai ürün elde etmek kolaylaşmaktadır (Azeez *et al.* 2013).



Şekil 21. Eriyik harmanlama yönteminin şematik gösterimi (Gürses *et al.* 2011).

Polimer/kil nanokompozitlerinin özellikleri

Genel olarak polimer/kil malzemeleri, saf matrise göre gelişmiş sertlik, mukavemet ve ısı direnci ve azalmış gaz geçirgenliği gösterir. Tüm bu gelişmeler, prensipte, geleneksel kompozit malzemelere göre çok daha düşük dolgu içeriklerinde (%5'ten az ağırlık) elde edilebilir; bu da ağırlık ve işlenebilirlik açısından bir avantaj sağlar (Stuart 2008).

Polimer/kil nanokompozitlerinin mekanik özellikleri

Sistematik olarak incelenen ilk polimer/kil nanokompozit sınıfı naylon-6/MMT'dir. Ağırlıkça %4,0 -5,0 civarında kil içerikleri için elastik modül neredeyse iki katına çıkmış ve çekme mukavemeti yaklaşık %50 artmıştır (Kojima *et al.* 1993; Haraguchi and Li 2006). Bu nanokompozitlerin tümü in-situ reaksiyonlarla elde edilmiştir. Yerinde polimerizasyonla elde edilen, organik olarak modifiye edilmiş MMT'ye sahip temsili bir ticari naylon-6, ağırlıkça %6'luk bir kil yüklemesi için elastik modülde %88'lik bir artış göstermiştir (Nguyen and Baird 2006). Kil dispersiyonunun önemi iki ayrı çalışmayla doğrulanmıştır. Liu ve diğerleri, eriyik harmanlama yoluyla ağırlıkça %4,2 kil içeren bir ara katkılı naylon-6/MMT nanokompoziti elde etti ve modülde yalnızca %25'lik bir artış gösterdi (Liu *et al.* 1999). Fornes ve ark. elastik modülde neredeyse %100 artış gösteren eriyik işleme yoluyla pul pul dökülmüş naylon-6/MMT sistemlerini hazırladılar (Fornes *et al.* 2001). Tüm durumlarda elastik modül ve çekme mukavemetindeki artışlara kopma uzamasındaki önemli azalmalar eşlik etmiştir.

Polimer/kil nanokompozitlerinin termal özellikleri

Polimer/kil nanokompozitlerinin termal stabilitesi genellikle termogravimetrik analiz (TGA) ile incelenir. Bu teknikte numune kütle kaybı sıcaklığın bir fonksiyonu olarak kaydedilir. Kilin polimer matrikse dahil edilmesi termal stabiliteyi artırır, kil plakaları bozunma ürünlerine karşı kütle taşıma bariyeri ve termal yalıtıcı görevi görür (Dabrowski *et al.*

2000). Alev geciktirici polimer/kil nanokompozitlerinde de gözlenmiştir ve kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Bu özelliği ölçmenin en yaygın yöntemi koni kalorimetrisidir (Gilman 1999).

Polimer/kil nanokompozitlerinin bariyer özellikleri

Gıda ambalajlama ve kaplama gibi uygulamalarda bariyer özellikleri büyük önem taşımaktadır. Yüksek en-boy oranlı levhacık benzeri dolgu maddeleri, polimer matrislerin gaz geçirgenliğini azaltmada çok etkilidir. Bunun nedeni, bir molekülün belirli bir malzeme kalınlığı boyunca yayılmak için izlemesi gereken yol olan "dolambaçlılıkveya labirent faktörü" olarak adlandırılan yoldaki artıştan kaynaklanıyor olabilir. PP/MMT ambalaj endüstrisi için özellikle ilgi çekicidir. Bu polimer neme karşı güçlü bir bariyer sunar ancak oksijene karşı nispeten geçirgendir. Osman ve ark. PP/MMT nanokompozitlerindeki oksijen geçirgenlik katsayısının artan kil içeriğiyle yüksek bir şekilde azaldığını gösterdi (Osman *et al.* 2007). Bariyer polimerleri, kullanıldığı durumda, ağırlıkça %5,0 MMT içeren polimer/kil nanokompozitlerinde su emme oranlarında yaklaşık %40 oranında bir azalma gözlemlenmiştir (Messersmith and Giannelis 1995). Pek çok çalışma, polimer/kil nanokompozitlerinin bariyer özelliklerindeki en iyi gelişmelerin, kısmi interkalasyon yerine tamamen eksfoliye edilmiş bir dağılımla elde edildiğine işaret etmiştir (Osman *et al.* 2003).

Polimer/kil nanokompozitlerinin reolojik özellikleri

Polimerik matristeki kil dispersiyonu reolojik özellikleri belirgin bir şekilde etkiler (Krishnamoorti *et al.* 1996; Plummer *et al.* 2005). Bu etkiler aynı zamanda MMT/HBP (Hyper Branched Polymer (Aşırı Dallanmış Polimer)) karışımlarında da gözlemlenmiştir (Rodlert *et al.* 2004b). Bu durumda MMT'nin sadece ağırlıkça %1,0'i reolojik davranışta ciddi bir değişikliğe yol açmıştır. Kil polimer nanokompozitleri, frekansın bir fonksiyonu olarak saf matrisle karşılaştırıldığında güçlü bir kayma incelmesine maruz kalır ve Newton platosu daha düşük frekanslara doğru kaydırılır (Sohn *et al.* 2003; Zhong *et al.* 2005; Park *et al.* 2007). Bu, muhtemelen kil plakaları arasındaki daralmış temasların etkisinden dolayı daha katı benzeri bir davranışın göstergesidir. Salınlı kayma deformasyonu sırasında büyük gerinimlerin uygulanması, kil plakacıklarının hizalanmasına ve taktoidal yapının parçalanmasına yol açar (Giannelis *et al.* 1999; Solomon *et al.* 2001; Abranyi *et al.* 2006).

Hibrit Kompozitler

Hibrit organik-inorganik malzemeler, organik ve inorganik bileşenlerden oluşan nanokompozitler olarak tanımlanabilir. Hibrit organik-inorganik malzemeler birkaç angstromdan (Å) birkaç nanometreye kadar değişen uzunluk ölçülerine sahiptir. Hibrit organik-

inorganik malzemelerin gelişimi esas olarak inorganik kimya işlemlerinin, özellikle sol-jel işlemlerinin geliştirilmesinden kaynaklanmaktadır. Sentetik koşullar, kırılğan yapılara sahip inorganik polimerizasyon reaksiyonları yoluyla elde edilen inorganik, organik ve hatta biyoaktif molekülün kimyasal olarak tasarlanmış kombinasyonlarına çok yönlü erişime izin verir (Sanchez and Ribot, 1994; Schubert, 2003; Gómez-Romero and Sanchez, 2005). Hibrit organik-inorganik malzemeler, yüksek katma değerli uygulamalar için büyük potansiyel sunar. Malzeme biliminde yeni ve muazzam bir alana erişim sağlayan çok sayıda hibrit organik-inorganik malzeme geliştirilmiştir. Bu çok işlevli ileri malzemelerin geliştirilmesinin optik, elektronik, iyonik, mekanik, membranlar, koruyucu kaplamalar, kataliz, sensörler ve biyoloji gibi alanlardaki gelecekteki uygulamalar üzerinde büyük etkisi vardır. Mevcut hibrit malzemelerin özellikleri arasında camların ve polimerlerin özellikleri arasında ayarlanabilir mekanik özellikler, geliştirilmiş optik özellikler ve geliştirilmiş katalitik veya membran bazlı özellikler yer almaktadır. Daha kesin olarak, mükemmel lazer verimliliğine ve iyi foto stabiliteye, çok hızlı fotokromik tepkiye, çok yüksek ve kararlı ikinci dereceden doğrusal olmayan optik tepkiye veya orijinal pH sensörlerine ve elektrolüminesans diyotlara sahip mevcut hibrit malzemeler rapor edilmiştir (Lebeau and Sanchez, 1999; Sanchez and Lebeau, 2001). Bununla birlikte, hibrit malzemelere yönelik uygulamaların geliştirilmesi, malzemelerin mekanik davranışı ile sınırlıdır (Mammeri *et al.* 2005). Hibrit polimer kompozitler, aynı zamanda iki veya daha fazla farklı tipteki takviyelerle güçlendirilmiş polimer matrisli kompozitlerdir (Kumar *et al.* 2012; Sinha *et al.* 2020). Takviyeler, kaynaklarına göre doğal ve sentetik elyaf olarak sınıflandırılabilir. Polipropilen, polyesterler, epoksiler vb. hibrit polimer kompozitlerde yaygın olarak kullanılan matrislerden bazılarıdır. Hibrit polimer matrisli kompozitlerin istenen özellikleri en iyi şekilde elde etmek için geliştirildiği açıktır. Sentetik elyaf takviyeli polimer kompozitler, doğal elyaf takviyeli polimer kompozitlerden daha yüksek mekanik dayanıma sahip olabilir. Sentetik fiberler pahalıdır ve dolayısıyla doğal fiberle güçlendirilmiş polimer kompozitler daha az maliyetlidir (Pickering *et al.* 2016). Hibrit nano dolgu polimer kompozitlerinin termal, elektriksel ve mekanik özelliklerine dayanan incelemelerde, polimerin dolgu maddeleri ile arasındaki etkileşimin ortaya çıktığı öne sürülmektedir. Hibrit polimer kompozitlerin seçimi, hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynar (Szeluga *et al.* 2015).

Melamin Formaldehit Reçinelerinin Uygulama Alanları

Melamin formaldehit reçineleri genellikle mutfak eşyalarında ve tabakların üretiminde kullanılır. Ancak, melaminden yapılan ürünler, doğrudan mikrodalga ışınlarını absorplayıp ısındıklarından, mikrodalga fırın kullanımına uygun değildir. Diğer termoset reçineler gibi

melamin reçinelerde eritilemez ve geri dönüştürülemez. Ayrıca, melamin yüksek basınçta üretilen lamine tabakaların yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Melamin reçineler yapıştırıcı olarak, dekoratif amaçlı panellerin yapımında, koruyucu kaplama olarak ve ayrıca kabin, masa üstü gibi değişik eşyaların yapımında da kullanılmaktadır. Melamin-formaldehit reçinesi, istenilen rengin verilebildiği birkaç termoset polimerlerden birisidir. Geniş kullanım alanına sahip olan melamin – formaldehit reçineleri aynı zamanda, tekstil sanayi, beton kimyasalları, çatı kaplama ürünleri, ayrıca solvent bazlı modifiye edilmiş melamin-formaldehit reçineleri endüstriyel boya üretiminde bağlayıcı olarak da kullanılmaktadırlar.

Polimerlerin kullanım alanlarının artmasıyla birlikte özelliklerinin geliştirilmesi çalışmaları da artmış ve nano ölçekli dolgu maddelerinin polimer özelliklerini geliştirdiğinin bulunmasıyla hangi katkı malzemelerinin daha etkili olduğu yönünde çalışmalar başlamıştır. Tabakalı yapıya sahip olan kil minerallerinin polimer matriks içerisinde dağılabilmeleri nedeniyle çok iyi katkı malzemesi olabilecekleri anlaşılmıştır. Böylece polimer/kil nanokompozitlerin hazırlanması, karakterizasyonu ve özelliklerinin belirlenmesi ile ilgili çalışmalar başlamıştır. Bu konuyla ilgili yapılan çalışmalardan bir kısmı aşağıda özetlenmiştir.

Park ve Jeong'un yaptığı çalışmada (2010), ahşap esaslı panel ürünleri için yüzey laminatlarının özelliklerini geliştirmek için, melamin formaldehit (MF) reçinesi-kil-selüloz nanokompozitlerinin sertleşme kinetiklerinin diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ile incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar nanokil tabakalarının MF matrisinde eksfoliye olmasının MF reçinesi-nanokil-selüloz nanokompozitlerin sertleşmesini geciktirdiğini göstermiştir.

Zhang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2013), melamin-etanolamin-formaldehit ve melamin-glikol-formaldehit reçinesi ve karboksillenmiş Fe_3O_4 nanoparçacıklarını içeren iki ayrı karışımdan mikrodalga köpürtme yöntemi ile yeni bir melamin-formaldehit- Fe_3O_4 köpüğü hazırlanmış, melamin formaldehit köpüğün özelliklerinin, yalnızca moleküler yapı ile değil aynı zamanda köpüğün hücresel yapısıyla da ilgili olduğu ve karboksillenmiş Fe_3O_4 nanoparçacıklarının, manyetik köpüğün hem tokluğunu hem de alev geciktirici özelliklerini iyileştirdiği bulunmuştur.

Wang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2020), süperhidrofobik bir melamin formaldehit köpüğü (SMF), sırasıyla polivinil alkol (PVA) sulu çözeltisine ve polidimetilsiloksani (PDMS) etanole basit bir yeşil çözelti daldırma yöntemiyle üretilmiştir. MF'nin sulu çözeltiden etanole aktarılması sırasında ortaya çıkan faz ayrımlı PVA, MF iskeleti üzerinde mikronano yapı oluşturabilir, böylece köpük yüzeyine önemli ölçüde pürüzlülük kazandırılabilir. PDMS'nin çapraz bağlanmasıyla birlikte yüzeyde hidrofobik kaplama oluşmuştur. Modifiye edilmiş köpük süperhidrofobiklik (157° 'de su temas açısı ve 7° 'de su

kayma açısı) sergiledi. Farklı organik solventlere karşı absorpsiyon kapasitesi değerlendirilmiştir. Bu arada, yağ-su ayırma verimliliğini kanıtlamak amacıyla, değiştirilmiş köpük bloğunu bir vakum sistemine bağlayarak yağ-su ayırmaya yönelik basit bir cihaz tasarlanmıştır. Mükemmel yağ-su ayırma kabiliyetine ek olarak, modifiye edilmiş köpük aynı zamanda 1 ila 13 arasında değişen çözelti pH'ı ile mükemmel korozyon direnci, dikkate değer geri dönüştürülebilirlik, geliştirilmiş mekanik özellikler ve yüksek alev geciktiriciliği dahil olmak üzere iyi basınç performansları da göstermiştir. Karmaşık yöntemler ve nanomateryaller içeren geleneksel gözenekli süperhidrofobik emicilerle karşılaştırıldığında, basit, düşük maliyetli ve çevre dostu bir yöntemle üretilen bu kadar verimli SMF, gelecekte petrol sızıntısı ve endüstriyel organik kirlilikle mücadelede umut verici bir durum oluşturmuştur.

Liao ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2019), melamin formaldehit (MF) köpüğün üç boyutlu ağ benzeri iskeletinde poliüretan (PU) reçinelerinin köpürtülmesiyle kompozit bir köpük, poliüretan-melamin formaldehit (PU/MF) köpük hazırlanmıştır. Bu tür kompozit köpüğün kimyasal yapısı, morfolojisi, hücre boyutu ve dağılımı, alev geciktiriciliği, termal özellikleri ve mekanik özellikleri sistematik olarak araştırılmıştır. PU/MF köpüğü, saf PU köpüğünden daha iyi yangın geciktiriciliğe sahip olduğu ve hatta kendi kendine söndüğü belirlenmiştir. Ayrıca karbonize MF iskelet ağının katkısı nedeniyle herhangi bir erime meydana gelmemiştir. Daha da geliştirmek için kompozit köpüğün alev geciktiriciliği, az miktarda bir fosfor alev geciktirici (amonyum polifosfat) ve kömür oluşturu bir madde (pentaeritritol), nitrojen açısından zengin MF ile birlikte köpüğe dâhil edilmiş ve böylece şişen bir alev geciktirici sistemi oluşturulmuştur. Alev geciktirici sistemi sayesinde, alev geciktirici PU/MF köpük, ısı ve oksijenin yayılmasını engelleyen etkili bir koruyucu katman görevi gören büyük miktarda genişletilmiş kömür üretebilmektedir. Sonuç olarak, alev geciktirici PU/MF köpük %31,2'lik daha yüksek bir sınırlayıcı oksijen indeksine ulaşmış ve anında kendi kendine sönme sergilemiştir. PU köpükle karşılaştırıldığında önemli ölçüde azaltılmış ısı salınım oranı ve toplam ısı salınımının yanı sıra daha yüksek kömür kalıntı oranı sergilemiştir. Ayrıca kompozit köpük, PU köpükle karşılaştırıldığında açıkça gelişmiş mekanik performans da göstermiştir. Genel olarak mevcut araştırma, tatmin edici alev geciktiriciliğe ve iyi kapsamlı özelliklere sahip bir polimer kompozit köpüğün üretilmesi için yeni bir yaklaşım sağlamaktadır.

Yan ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2022), melamin köpük, üstün alev geciktirici özellikleri, ısı yalıtım etkileri, dumanı bastırma yeteneği, düşük toksisite ve ses soğurma özellikleri nedeniyle günlük yaşamda ve yapı malzemelerinde yaygın olarak kullanıldığı belirtilmiştir. Melamin köpüğün kullanışlılığını arttırmak ve düşük toksik, yüksek mukavemetli köpük hazırlamak için çoğu araştırma reçine depolama süresinin uzatılmasına odaklanmıştır.

Bu çalışmada, melamin reçinesini modifiye etmek için alil glisidil eter kullanılmış ve modifiye reçine, geleneksel reçinelere göre daha uzun bir depolama süresi gösterebilmiş ve modifiye reçinenin depolama süresi 90 günü aşmış ve düşük serbest kalma süresine sahip olmuştur. Ayrıca, hazırlanan köpük mükemmel alev geciktirici özellikler, düşük hacimli su emme (%0,94) ve daha düşük termal iletkenlik sergilemiştir ($0,0225 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$). Aynı zamanda, optimum koşullara göre hazırlanan köpük, yaklaşık 5,08 MPa'lık yüksek bir basınç dayanımına sahipti. Geleneksel melamin köpüğünden 17,5 kat daha yüksektir. Bu nedenle yüksek performanslı köpüklerin hazırlanmasında bu yöntemin yeni bir yaklaşım olduğu öne sürülmektedir.

Nemanič ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2014), vakumlu ısı yalıtımı için yeni bir çekirdek malzemesi olan melamin-formaldehit (MF) sert köpük, şişirme maddesi olarak pentan kullanılarak 130°C ile 150°C arasındaki sıcaklıklarda melamin-formaldehit reçinesinin emülsiyonundan sentezlenmiştir. İstenilen mekanik özelliklere sahip açık gözenek yapısı, sıvı reaktanların başlangıç kimyasal bileşiminin değiştirilmesi ve klasik ısıtma kullanılarak kontrollü köpüklenme ve sertleştirme yoluyla elde edilmiştir. Elde edilen gözeneklilik %92 ile %98 arasında olmuştur. Ortalama gözenek boyutu doğrudan Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile ve dolaylı olarak 10^{-3} mbar basınçtan atmosfer basıncına kadar geniş bir basınç aralığında termal iletkenliğin ölçülmesiyle belirlenmiştir. Sentezin optimizasyonu, yalnızca $0,006 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ 'e eşit termal iletkenlik ve son derece düşük bir gaz çıkış oranıyla sonuçlanmıştır. Uzun vadeli basınç artışı ölçümleri ile MF sert köpüklerinin performansı seçilen inorganik çekirdek malzemeleriyle karşılaştırılabilmektedir. Geleneksel organik köpüklerle karşılaştırıldığında diğer avantajları, 200°C 'yi aşan bir sıcaklığa dayanabilmeleri nedeniyle stabiliteleri yüksek ve yangın dirençleri iyi olmasıdır.

Cai ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2007), sertleşmeden önce hidrofilik ve sertleştikten sonra hidrofobik hale gelen suda çözünür melamin-üre-formaldehit (MUF) ön polimerinin iki tür silikat nano parçacık kullanılarak hazırlanmış kompozitlerde, su absorpsiyonu, sertlik ve esneklik modülü (MOE) gibi katı ahşap özelliklerdeki iyileşmeler incelenmiş ve özellikle su absorpsiyon davranışında ciddi iyileştirmelerin ortaya çıktığı bulunmuştur.

Pevida ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2008), Melamin formaldehit köpüğü CO_2 adsorpsiyonu için silika üzerinde sentezlenerek kullanılmıştır. Melamin-formaldehit reçinelerinden oldukça gözenekli azotla zenginleştirilmiş karbonlar üretmek için bir kalıplama tekniği kullanılmıştır. Polimer matrisine dâhil edilen azot, azotun uçucu ve termal kaybı

açısından adsorbanların daha fazla stabilitesine neden olur. CO₂ yakalama performansları, bir termo terazide 25°C ile 75°C arasında değerlendirilmiştir.

Bono ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2003), formül değişiminin reçine depolama kararlılığı, suda çözünürlük ve oda sıcaklığında kürlleme süresi gibi reçine özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuçlar, MUF reçinesi işleminin 3 aşamalı reaksiyonunda, her reaksiyon aşamasında formaldehitin üre/melamin oranının MUF reçinesi kürlleme süresinde, suda çözünürlükte ve reçine depolama kararlılığında önemli bir artışa neden olduğunu göstermiştir. Yeterli miktarda melamin ve üre içeren bu formülasyonlar, melamin-formaldehit (MF) reçinesine kıyasla daha ucuzdur ve iyi performans sağlama kapasitesine sahiptir. Farklı uygulamalarda çeşitli MUF reçinesi özellikleri gerekmektedir. MUF reçinesi özellikleri, her reaksiyon aşamasında formaldehitin melamin/üre mol oranı ve amino bileşiklerinin reaksiyona girdiği reaksiyon aşaması sayısı gibi çeşitli faktörlerden etkilenmektedir. Önceki araştırmalar, istenen özelliklere sahip MUF reçinesi geliştirmiştir. Ancak, formülasyonda maliyet ve performansı dengelemek için yeterli miktarda melamin veya üre yoktur. Bu çalışmada, daha kısa kürlleme süresi yalnızca harici ısı yardımıyla elde edilebilmiştir.

Ricciotti ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2013), termoset melamin bazlı epoksi reçinelerinin hazırlanması için yeni, kolay ve uygun maliyetli bir sentetik prosedür hazırlanmıştır. Bu yenilikçi sentetik yöntemle, sadece reaktifleri bir katalizör varlığında, çözücü olmadan ve hafif kürlleme koşullarıyla karıştırarak farklı reçine türleri elde edilebilir. Melamin ve bir glisidil türevi (reçine I) veya bir silan türevi (reçine II) eklenerek iki tür reçine sentezlenmiştir. Reçineler kimyasal-fiziksel ve termal teknikler aracılığıyla karakterize edilmiştir. Deneysel sonuçlar, hazırlanan tüm reçinelerin iyi bir termal stabiliteye sahip olduğunu, ancak mekanik özellikleri açısından farklılık gösterdiğini göstermektedir. Reçine I, oda sıcaklığında 830 MPa'ya kadar bir depolama modülü değeriyle dikkate değer bir sertlik sergilerken, reçine II için daha düşük depolama modülleri bulunmuştur; bu da silan gruplarının varlığının bu malzemelerin esnekliğini artırabileceğini göstermektedir. Reçineler 30 dakikadan daha uzun bir kap ömrü gösterir, bu da bu reçineleri pratik uygulamalar için daha uygun kılmaktadır. Silan sonlandırmalarıyla işlevselleştirme, hibrit organik-inorganik kompozit malzemelerin formülasyonunda kullanılabilmektedir.

Zhang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2013), MUF reçinelerinin performans ve sertleşme davranışları üzerine melamin ekleme adımıının etkisi incelenmiştir. Bu yapıştırıcılarla yapıştırılan üç katlı kontrplak imal edilmiş, yapışma mukavemeti ve formaldehit emisyonları ölçölmüştür. Reçinelerin sertleşme davranışı ve fonksiyonel grupları, diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ve Fourier dönüşümlü infrared spektroskopisi (FT-IR) ile ölçölmüştür.

Aktivasyon enerjileri, Kissinger denklemi ve Kissinger Akahira-Sunose (KAS) yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki melamin toplama ve ekleme aşamasının üzerinde önemli etkileri olduğu tespit edilmiştir.

Norlize'nin yaptığı çalışmada (2012), çeşitli filler (dolgu) tipleri ve farklı MUF reçine formulasyonları geliştirilmiştir. Yapıştırıcının çalışma özellikleri ve kalitesi açısından performansı, dolgu maddesi olarak kullanılan malzeme türleri ile iyileştirilmektedir. Melamin Üre Formaldehit (MUF) reçinesi, Melamin Formaldehit (MF) ve Üre Formaldehit (UF) reçinelerine kıyasla daha az maliyetli ve yüksek su direnci nedeniyle ahşap yapıştırıcı üretiminde reçine olarak seçilmiştir. Bunun nedeni, MUF reçinelerinin maliyetinin melamin ve üre oranına bağlı olmasıdır. Amaç, ahşap yapıştırıcı üretiminde kullanılan dolgu çeşitlerini çalışma özellikleri ve kalitesi açısından karşılaştırmaktır. Ahşap yapıştırıcının kesme mukavemeti ve ahşap kırılması, çalışma özelliklerini belirlemek için incelenmiştir

Aliç ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2012), MF reçinesi ile bütül stearat mikro-enkapsülasyonu gerçekleştirilmiştir. Elde edilen mikro- kapsüllerin bileşim ve termal kararlılığı üzerine pH'nın etkisi incelenmiştir. Bu çalışmanın amacı, melamin-formaldehit (MF) reçinesi ile mikrokapsülleme işlemi sırasında pH rejimlerinin farklı düşüşünün, faz değiştiren bir malzeme (PCM) içeren mikrokapsüllerin bileşimini, morfolojisini ve termal kararlılığını nasıl etkilediği incelenmiştir. PCM olarak teknik bütül stearat kullanıldı. Mikrokapsülasyon 70°C'de gerçekleştirilmiştir. Tüm deneyler için başlangıç pH değeri 6.0 idi. Başlangıç pH değerinde bir saatlik mikrokapsüllemeden sonra, pH değeri kademeli veya doğrusal bir şekilde nihai pH değerine (5,5; 5,0; 4,5) düşürülmüştür. Mikrokapsüllerin özellikleri, mikrokapsülleme işlemi sırasında ve sonrasında izlendi. Sonuçlar, pH değeri düşürme rejiminin mikrokapsüllerin morfolojisi ve stabilitesi için kritik olduğunu göstermiştir. pH değerinin kademeli olarak düşürüldüğü mikrokapsüllemeler sırasında, mikrokapsülleme ürünündeki MF reçinesi miktarının, doğrusal bir pH değeri düşüşüne sahip mikrokapsüllemelere kıyasla daha hızlı arttığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, pH değerinin kademeli olarak düşürüldüğü mikrokapsülleme durumunda daha hızlı biriktirme, daha kalın MF kabukları ile sonuçlanmamıştır. Kabuk kalınlığı, pH değeri doğrusal bir şekilde veya birkaç küçük adımda azaltıldığında çok daha hızlı arttı. Mikrokapsüllerin en iyi termal kararlılığı için, mikrokapsülleme sırasındaki pH değerinin doğrusal bir şekilde veya daha küçük adımlarla 5,0 veya altına düşürülmesi gerektiği gösterilmiştir.

Bajia ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2009), melamin-formaldehit reçinesinin verimli bir sentezi, farklı mol oranlarında geleneksel ve mikrodalga ışınlamaları (katı desteksiz

ve destekle) kullanılarak elde edilmiştir. Reçine örnekleri kimyasal ve fiziksel özellikleri açısından test edilmiştir. Tüm reçinenin yapısı, spektral verileriyle desteklenmiştir.

Rezaei ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2008), aldehit, 1,3-dikarbonil bileşikler ve (tiyo)ürenin geleneksel ve mikrodalga ışıma koşulları altında Biginelli yoğunlaştırma reaksiyonu yoluyla ucuz ve kolayca bulunabilen bir reaktif olarak melamin-formaldehit reçinesi kullanılarak dihidropirimidinonların etkili bir sentezi tarif edilmiştir. Mükemmel verimler, ürünlerin oluşumu için kısa reaksiyon süreleri ve basit çalışma bu protokolün çekici özelliklerini oluşturmaktadır.

Gindl ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2003), bitkisel hücre duvarlarının MF reçinesi ile impregnasyonu incelenmiştir. Melamin-formaldehit (MF) reçine emprenyesi, yüzey sertliği ve hava koşullarına dayanıklılık gibi bir dizi ahşap özelliğini iyileştirmek için önemli bir potansiyel göstermiştir. Çalışmada, MF reçinesinin yumuşak ahşabın hücre duvarına alımını etkileyen seçilmiş faktörler incelenmiştir. UV mikrospektroskopisi kullanılarak suda çözünür MF'nin ikincil hücre duvarına ve orta lamel içine iyi bir şekilde yayıldığı gösterilebilmektedir. 20 saatlik bir emdirmeden sonra %24'e kadar yüksek konsantrasyonlar elde edilmektedir. Yüksek hücre duvarı nem içeriği, emprenye için kullanılan reçinenin yüksek su içeriği ve düşük özütlenme içeriği, MF reçinesinin hücre duvarına alınması için uygun olan faktörler olduğu ifade edilmiştir. Kuru hücre duvarları için, çözücü değişim kurutması, hücre duvarlarının suya batırıldığı durumda olduğu gibi, benzer bir ölçüde reçine alımını iyileştirdiği görülmüştür.

Karakaya ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2007), yağ asidi kalıntıları içeren aşırı dallanmış reçineler sentezlenmiştir. Çekirdek molekül olarak altı hidroksil grubuna sahip dipentaeritritol kullanılmış ve (i) hint yağı ve (ii) hint yağı ve keten tohumu yağı karışımı ile 240°C'de transesterifiye edilmiştir. Ortaya çıkan külün, hint yağından gelen hidroksil içeren risinoleik asit kalıntısına sahip olduğu görülmüştür. Daha sonra katalizör olarak kullanılan para-toluen sülfonik asit varlığında 140°C'de dimetilol propiyonik asit ile esterlenmiştir. Bu şekilde üretilen aşırı dallanmış reçine daha sonra özelliklerini iyileştirmek için melamin-formaldehit reçinesi ile karıştırılmıştır. Reçineler, FT-IR spektroskopisi ile karakterize edildi ve termal özellikler, DSC ile belirlendi. Reçineler 316°C'ye kadar termal olarak kararlı olduğu belirtilmiştir. Sadece hint yağı kullanılarak sentezlenen reçinenin viskozitesi 3,0 Pa s iken, %50 keten tohumu yağı kullanılarak sentezlenen reçinenin viskozitesi 1,0 Pa s olmuştur. Dimetilol propiyonik asit ile reaksiyona sokulduğunda, önceki reçinenin viskozitesi 7,0 Pa s'ye ve ikinci reçineninki 3,7 Pa s'ye yükselmiştir. Aşırı dallanmış reçineler mükemmel yapışma, parlaklık, esneklik ve şekillendirilebilirlik göstermiştir. Karışık reçinenin (yani aşırı dallanmış ve melamin-formaldehit) daha yüksek sertlik değerlerine, ancak daha düşük parlaklık, yapışma ve

eğilme direncine sahip olduğu görülmüştür. Her iki reçine türünün de iyi darbe ve aşınma direncine sahip olduğu görülmüştür.

Chen'in çalışmasında (2009), melamin reçinesinin çapraz bağlanma davranışını ve termal özelliklerini incelenmiştir. Ahşap-melamin-reçine kompozitlerinin işlenmesini ve mekanik performansı da değerlendirilmiştir. Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) teknikleri kullanılarak çapraz bağlanma reaksiyonunun kinetiği bulundu ve aktivasyon enerjisi de belirlenmiştir. Ek olarak, tork reometrisi sonuçları, 70 ila 100°C arasında düşük bir işleme sıcaklığı tespit edilmiştir. Ahşap içeriğinin etkisinin çapraz bağlanma kinetiğini ve ahşap dolgulu melamin reçinelerinin işlenmesini önemli ölçüde etkilediği de bulunmuştur. Daha yüksek odun içeriği, daha hızlı sertleşmeye ve daha düşük sertleşme sıcaklığına neden olmuştur. Çalışmada ayrıca kovan/kalıp sıcaklık profili ve ekstrüzyon sonrası kürleme de dahil olmak üzere çeşitli ekstrüzyon parametreleri değerlendirilmiştir. İşleme sıcaklığının 120°C'den 70°C'ye düşürülmesi, kompozitlerin mukavemetini ve modülünü artırmıştır. Ek olarak, 6 saatlik ekstrüzyon sonrası kürlemenin kompozitlerin eğilme mukavemetini arttırdığı bulunmuştur. Öte yandan, eğilme modülü üzerinde ihmal edilebilir bir etki vardı. Melamin reçinelerinin suya karşı yüksek direnci nedeniyle kompozitlerin su alımı yavaş olmuştur. Deney ortamında oda sıcaklığında sonradan kürlenen kompozitler daha iyi nem direnci ve en düşük difüzyon katsayıları göstermiştir. Bununla birlikte, 175°C'de sertleştirmeden 6 saat sonra numuneler en iyi boyutsal kararlılığı göstermiştir.

Zengin ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2012), krom içermeyen deri üretiminde oligomerik melamin-formaldehit reçinesinin kullanımı araştırılmıştır. Hâlâ en popüler deri tabaklama prosedürü olan krom tuzu tabaklama sistemi, çevreci grupların ve uluslararası düzenlemelerin sürekli baskısı altındadır. Bu nedenle kromsuz deri üretimi konusunda uzun yıllardır sayısız deneyler yapılmaktadır. Çalışmada krom tabaklama maddesine alternatif olarak tabaklama ve ön tabaklama maddesi olarak yeni üretilen sentetik ve inorganik kimyasallar kullanılmıştır. Demir dışı metal endüstrisindeki atıkların işlenmesiyle elde edilen yeni titanyum bazlı tabaklama maddesi, ana tabaklama maddesi olarak kullanılmıştır. Ayrıca kromsuz deri üretimi için ön tabaklama maddesi olarak oligomerik melamin-formaldehit reçinesi ve resorsinol tipi önepolimer kullanılmıştır. Üretilen kromsuz derilerin fiziksel testleri ve kimyasal analizleri, bazik krom sülfat ile tabaklanmış derilerle karşılaştırılabilir sonuçlar vermiştir.

Wang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2012), MF köpükler hazırlanmış termal ve mekanik özellikleri incelenmiş ve bu köpüklerin mevcut izolasyon köpüklerine iyi bir alternatif olacağı ileri sürülmüştür. Melamin formaldehit (MF) köpük, yangın geciktirici bir malzeme olup, akustik ve ısı yalıtımı alanında büyük potansiyele sahiptir. Mikrodalga radyasyonu ile MF

reçine köpüğü hazırlanmıştır. Morfolojisi, görünür yoğunluğu, alev geciktiriciliği ve mekanik özelliği açısından farklı emülgatörlerin MF köpüğün termal stabilitesine etkisi tartışılmıştır. Hazırlanan MF köpüğün ayrışma sıcaklığı yaklaşık 400°C'dir ve yanma sonrası kalıntı oluşumu karbon ve grafitten oluşmaktadır. Emülgatör, MF köpüğünün görünür yoğunluğunu etkiledi ve koemülgatörlerin kullanılması, düzgün hücre boyutuna, iyi morfolojiye ve düşük görünür yoğunluğa sahip esnek köpük elde edebilir. Yangın geciktirici MF köpüğün görünür yoğunluğu 5,53 kg/cm³ gibi düşük olduğunda, tutuşma kaybı değeri 32,4'e ulaşabilmektedir. Köpüğün mekanik özelliği, görünür yoğunluk ile tutarlıdır.

Bhatti ve Zuber'in yaptığı çalışmada (2009), melamin üre esaslı önkondensatların sentez ve uygulaması incelenmiştir. Formaldehit esaslı düşük molar kütleli önkondensatlar (fikse ediciler), dokuma kumaşların işlenmesinde her zaman çok önemli bir role sahiptir. Bu kimyasalların iki önemli uygulaması, boyaların sabitlemesi ve kumaşların kırılmazlık davranışlarının iyileştirilmesidir. Isı ile sertleşen reçineler sınıfına ait olan formaldehitin çeşitli mol oranlarında melamin/üre ile reaksiyonu ile bir dizi önkondensatın sentezi açıklanmaktadır. Boyalı pamuk numuneleri fikse edicilerle emprenye edilmiş ve asetik asit kürlenme katalizörü kullanılarak 150°C'de 3 dakika kürlenmiştir. Sürtünerek çatlamaya karşı haslık, yıkamaya karşı renk haslığı ve ışık haslığı rapor edilmiş ve önkondensatın boyaya sabitleme etkinliğine bağlı olduğu bulunmuştur. 50:50 melamin-üre-formaldehit mol oranına dayalı önkondensat, mükemmel sabitleme etkinliği göstermiştir. Işık haslığının melamin halkasının aromatik karakterine bağlı olduğu bulunmuştur ki bu, açıkça tercihen UV bölgesindeki absorpsiyondan kaynaklanmaktadır. Yoğun bir renge ve iyi özelliklere sahip kumaşlar elde edilmiş, böylece uygulamada uygulanan tekstil önkondensatlarının uzatılmasına olanak sağlanmıştır.

Cao ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2017), üre formaldehit reçinesi (UF), serbest formaldehit miktarını azaltmak ve katı içeriğini artırmak için yoğunlaşma sırasında melamin eklenerek modifiye edilmiştir. Melamin modifiyeli UF (MUF) ilk olarak şişen alev geciktirici (IFR) ile karıştırılmış ve daha sonra alev geciktirici genleşebilir PS (EPS) köpükleri hazırlamak için önceden genleştirilmiş polistiren (PS) parçacıklarının yüzeyine kaplanmıştır. EPS köpük numunelerinin yanıcılığı, sınırlayıcı oksijen indeksi (LOI), UL-94 dikey yanma ve koni kalorimetre testleri ile karakterize edilmiş ve sonuçlar, tepe ısı salınım hızının 406'dan 49 kW/m²'ye önemli ölçüde düştüğünü ve LOI değerinin IFR ile kaplandıktan sonra UL-94 36,3'e ulaşabileceğini göstermiştir. Duman yoğunluğu testi, maksimum duman yoğunluğunun IFR eklenmesiyle azaldığını gösterdi. Termal analiz, termal kararlılığın ve kömür oluşumunun kaplanmış alev geciktiricilerin varlığıyla önemli ölçüde iyileştirildiğini göstermiştir. Kalan kömür gözlemi, MUF ve IFR'nin içi boş stentlerle entegre kömür katmanları oluşturmak için

yararlı olduğunu ortaya koydu; bu, alev geciktirici özelliklerin iyileştirilmesinin ana nedeni olabilmektedir. Alev geciktirici EPS köpüklerinin mekanik özellikleri, endüstriyel uygulamalar için standart gereklilikleri hala karşılayabilmektedir.

Li ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2021), yüksek kapalı hücre içeriğine sahip melamin-formaldehit (MF) sert köpükler, matris olarak melamin ve paraformaldehitten hazırlanan MF önpolimeri, köpürtücü madde olarak siklohekzan, köpük stabilizatörleri olarak dimetil silikon yağı ve katalizör olarak hidroklorik asit kullanılarak fırın ısıtma işlemi ile hazırlanmıştır. MF önpolimer viskozitesinin, köpürme sıcaklığının, katalizör miktarının MF sert köpüklerin morfolojisi, kapalı hücre içeriği, görünür yoğunluğu, su emilimi ve basınç dayanımı üzerindeki etkisi sistematik olarak incelenmiştir. Optimize edilmiş köpürtme koşulları şu şekildedir: MF önpolimerinin viskozitesi 35 Pa·s ile 45 Pa·s arasında değişmektedir, köpürtme sıcaklığı 125°C'dir ve katalizör içeriği %0,65'tir. Hazırlanan MF köpükler, %83,5 kapalı hücre içeriği, 62 kg·m⁻³ görünür yoğunluk, %12,0 su emilimi, 292 kPa basınç dayanımı, 0,033 W m⁻¹ K⁻¹ ısı iletkenliği ve %36 sınırlayıcı oksijen indeksi (LOI) ile en iyi kapsamlı performansı göstermiştir. Geleneksel organik köpüklerle karşılaştırıldığında, MF sert köpükler yüksek kapalı hücre içeriği nedeniyle düşük su emilimine, mükemmel ısı yalıtımına ve alev geciktiriciliğe sahiptir ve bina dış duvarları için ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılması beklenebilmektedir.

Xiong ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2021), melamin formaldehit (MF) reçinesi, üstün alev geciktiriciliğe ve yüksek termal kararlılığa sahip bir termoset polimer olduğundan ve yangın geciktirici kaplamalarda, alev geciktirici levhalarda, ısıya dayanıklı filtre malzemelerinde vb. yaygın olarak kullanıldığı için sıcak suda MF önpolimeri ile iyi karıştırılabilen, yüksek tokluk ve elastikiyete sahip suda çözünür bir polimer olan polivinil alkol (PVA), MF reçinesinin tokluğunu artırmak için kullanılmıştır. KH-550 ile modifiye edilen nano-silikon dioksit (SiO₂) parçacıkları, MF önpolimeri ile PVA arasındaki uyumluluğu artırmak için kullanılmıştır. Dahası, modifiye edilen nano-SiO₂ aynı anda tokluğu artırabilmekte ve MF reçinesinin mukavemetini etkileyebilmektedir. Modifiye edilen MF reçinesinin bileşenlerinin etkileşimi, fraktografisi, termal kararlılığı, alev geciktiriciliği ve mekanik özellikleri sistematik olarak incelenmiştir. FT-IR sonuçları, KH-550'nin nano-SiO₂ yüzeyine başarıyla aşılandığını göstermektedir. Aşılanmış nano-SiO₂, değiştirilmemiş olandan daha iyi bir matris dağılımı göstermiştir ve ayrıca MF ile PVA arasındaki uyumluluğu ve arayüz yapışmasını iyileştirmiştir.

Hazarika ve Maji'nin yaptığı çalışmada (2013), melamin-formaldehit-furfuril alkol kopolimeri ve modifiye kile dayalı odun-polimer nanokompozitlerinin özellikleri incelenmiştir.

Bir melamin formaldehit-furfuril alkol (MFFA) kopolimeri, n-metilol akrilamid (NMA), çapraz bağlama maddesi ve montmorillonitin (MMT) bir katalizör ısı işlemi kullanılarak ahşaba (*Ficus hispida*) emdirilmesiyle bir ahşap polimer nanokompoziti hazırlanmıştır. MMT, polimerize edilebilir bir yüzey aktif madde 2-akriloloksi etil trimetil amonyum klorür (ATAC) ve yüzey aktif maddeler ATAC ve setil trimetil amonyum bromür (CTAB) karışımı kullanılarak 1:1 mol oranında modifiye edilmiştir. FT-IR ve XRD çalışmaları, MFFA kopolimeri NMA'nın oluşumunu ve MMT'nin modifikasyonunu doğrulamıştır. Bu çalışmalar ayrıca ahşap, polimer, çapraz bağlayıcı ve MMT arasında bir etkileşim olduğunu göstermiştir. Modifiye edilmiş MMT ile işlenmiş ahşap, modifiye edilmemiş kil ile işlenmiş ahşap numunelere göre daha düşük su alımı, daha yüksek boyutsal kararlılık, gelişmiş kimyasal direnç, termostabilite, alev geciktirme ve daha iyi mekanik özellikler sergilemiştir. Kombine surfaktan (ATAC+CTAB) ile modifiye edilmiş kil ile işlenen numuneler, tekli surfaktan (ATAC) ile modifiye edilmiş kil ile muamele edilen numunelere kıyasla daha iyi özellik sergilemiştir.

Devallencourt ve arkadaşlarının yaptığı çalışma (2000), sıvı halde ^{13}C nükleer manyetik rezonans ve dinamik mekanik analiz, yüksek NH oranına sahip bir melamin formaldehit köpüğünün sulu çözeltilerine daldırılmış külsüz filtre kâğıdı örneğinden elde edilen kompozit malzemeler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Reçine sulu çözeltisi pH 6, 7 ve 9'da incelenmiştir. 85°C'de gerçekleştirilen kürlemenin ardından asit koşullarının, amino reçinenin kendi kendine kondenzasyon reaksiyonları nedeniyle kompozitin mekanik özelliklerini iyileştirdiğini, diğer pH'larda ise iyileştirmedikçe göstermiştir. 140°C'de ve asit koşulları altında gerçekleştirilen kürleme için reçinenin çapraz bağlanma derecesi artmıştır.

Bayati'nin çalışmasında (2015), MF destekli atapulgite kili üzerine krom ve mangan iyonlarının çözeltiden adsorpsiyonu incelenmiştir. Çalışmada, atapulgit melamin formaldehit (AMF %5) olarak adlandırılan yeni bir kompozit türü, temel destekli malzeme olarak atapulgit varlığında melamin formaldehit ile poli-kondensasyon polimerizasyonu kullanılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan kompozit, değişen pH, temas süresi, iyon konsantrasyonu ve sıcaklık koşullarında adsorpsiyon işlemiyle hem Cr^{+6} hem de Mn^{+2} iyonlarını uzaklaştırmak için kullanılmıştır. Yeni oluşan kompozitin seyreltik sulu çözeltilerde iki metal iyonuna karşı adsorpsiyon özellikleri spektrofotometrik olarak izlenmiştir. İncelenen iki metal iyonunun giderim miktarının, ekzotermik davranış gösteren sorpsiyon işlemi ile Freundlich izotermi yakından takip ettiği görülmüştür. Sorpsiyon kinetiği, yalancı birinci dereceden ve yalancı ikinci dereceden kinetik modeller kullanılarak analiz edilmiştir. Sonuç olarak, atapulgit kilinin (AMF %5) basit adsorpsiyonu için önemli bir destek olduğu belirtilmiştir.

Rashid ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2020), nikel ile katkılanmış elektro-iletken melamin-formaldehit reçinesi (MFR) kompozitleri iki aşamada hazırlanmıştır. İlk adımda, mikron boyutunda elektro-iletken MFR/polianilin (PANI) kompozit parçacıkları, mezogözenekli MFR çekirdek parçacıklarının varlığında anilinin yerinde tohumlanmış kimyasal oksidatif polimerizasyonu ile hazırlanmıştır. Daha sonra MFR/PANI kompozit parçacıklarının yüzeyi, Ni (II) tuzunun yerinde kimyasal indirgenmesi yoluyla Ni parçacıklarıyla katkılanmıştır. Hazırlanan MFR/ PANI/Ni kompozit parçacıklarının boyutu, kimyasal bileşimi ve manyetik özellikleri taramalı elektron mikroskobu (SEM), geçirimli elektron mikroskobu (TEM), Brunauer-Emmett-Teller (BET) yüzey analizi, X ışını difraksiyonu (XRD), X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS), termal gravimetrik analiz cihazı (TGA), titreşimli numune manyetometresi (VSM) ve Fourier Dönüşümü IR (FT-IR) ile analiz edilmiştir. Sonuçlar, MFR/ PANI kompozit parçacıklarının yüzeyinin, MFR/PANI'nin Ni'ye ağırlık oranı 1/0,1 olduğunda Ni parçacıklarıyla en iyi şekilde katkıldığını göstermiştir. Ni miktarındaki artış daha yüksek aglomerasyona neden olmuş ve bazı serbest Ni parçacıklarını üretmiştir. MFR/PANI/Ni kompozit parçacıkları paramanyetik özelliklere sahiptir. MFR/ PANI/Ni kompozit malzemelerin elektrokimyasal/kapasitif performansı döngüsel voltametri (CV) ile değerlendirilmiştir. MFR/PANI kompozit parçacıklarının artan miktarda Ni parçacıklarıyla yüzey katkılanması, süperkapasitörde uygulamaya uygun spesifik kapasitans değerini geliştirmiştir (Rashid *et al.* 2020).

Azarpour ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2022), öne çıkan bir iletken polimer olarak polianilinin (PANI) modifikasyonu ile iletken polimerler alanında fiziksel özelliklerinin ve işlenebilirliğini geliştirmek amaçlanmıştır. Bu amaçla melamin-formaldehit (MF) kopolimerleri, çeşitli melamin ve formaldehit oranlarında kondenzas polimerizasyonu ile sentezlenmiştir. Hazırlanan oranlardan seçilen durum, polianilin ve polianilinmelamin kopolimerinin iletkenliğini arttırmak amacıyla serbest -NH₂ grupları içeren bir kopolimer elde etmek için melaminin formaldehite göre fazla olan durumudur. Kopolimerizasyon, oksitleyici bir madde olarak amonyum persülfat kullanılarak anilin ve melaminin yerinde oksidatif polimerizasyonu yoluyla gerçekleştirilmiştir. Melamin-formaldehit üzerine aşılınmış bir kopolimer elde etmek için farklı anilin ve melamin oranları kullanılmıştır. Bir sonraki aşamada modifiye montmorillonit varlığında yerinde aşı kopolimerizasyonu ile iletken kompozitler hazırlanmıştır. Elde edilen aşılınmış kopolimerler ve nanokompozitler amonyak çözeltisinde katkısız hale getirilerek kurutulmuştur. Son olarak, elde edilen katkısız aşılınmış kopolimerler ve nanokompozitler poli (stiren-alt-maleik asit) ile yeniden doplanmıştır. Elde edilen ürünler çeşitli spektroskopik yöntemlerle karakterize edilmiştir. Termogravimetrik analiz (TGA), sentezlenen tüm nanokompozitlerin saf polianilin ve melamin formaldehit kopolimerinden daha

iyi bir termal stabilite sunduğunu göstermiştir. Aşılınmış kopolimerlerin çözünürlük testi, polar solventlerdeki çözünürlüklerinin polianilin ile karşılaştırıldığında daha iyi olduğunu göstermiştir. Ayrıca, sentezlenen numunelerin elektriksel iletkenliğini ölçmek için iki proflu kronoamperometri kullanılmış ve sonuçlar, hazırlanan aşılınmış kopolimer ve nanokompozitlerin (PANI) durumunda geliştirilmiş işlenebilirlikleri ile iletken olduğunu göstermiştir.

Ivanova ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2018), karışık anilin-melamin-formaldehit polimeri, monomerlerin formaldehit ile paralel polikondensasyonu ile sentezlenmiştir. Cu (II) klorür ve bakır oksitler (CuO, Cu₂O) prosese yerinde olarak dâhil edilmiştir. XRD analizi, CuCl₂'nin polimere dâhil edilmesinde kristal CuO fazlarının varlığını ve bakır katyonlarının elektrokimyasal indirgenmesinin neden olduğu nitroanilin elektrohijrojenasyonunda katalizör olarak kullanıldıktan sonra sentezlenen tüm kompozitlerde bakır parçacıklarının ortaya çıktığını göstermiştir.

Sentezlenen kompozitlerin o-nitroanilin elektrohijrojenasyonunda katot aktivasyonu için kullanılması, elektrokimyasal indirgemeye kıyasla işlem hızını 1,5-2,5 kat artırmış ve o-fenilendiamine %100 dönüşümü sağlamıştır.

Paiva ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2012), melaminle güçlendirilmiş UF reçineleri güçlü bir asit prosesi kullanılarak sentezlenmiştir. Melamin, çoğunlukla hidroliz direnci ve formaldehit emisyonu açısından yonga levhaların performansını artırmak için üre-formaldehit (UF) reçinelerinin sentezine dâhil edilebilmektedir. Melamin ilavesi için en uygun yöntemde, reaksiyon pH'ının reçine özellikleri ve performansı üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi gerekmektedir. Sonuçlar, melamin katkısının, başlangıçtaki asidik aşamada eklendiğinde daha etkili olduğunu göstermiştir. Düşük pH'larda (<3,0) reaksiyonun çok hızlı gerçekleştiği ve kontrolün zorlaştığı, yüksek pH'larda (>5,0) yoğunlaşma reaksiyonunun son derece yavaşladığı belirlenmiştir. Öte yandan pH 4,5-4,7 aralığında (optimum pH) sentezlenen reçinelerle üretilen panellerin hem iç bağ kuvveti hem de formaldehit emisyonları açısından genel performanslarının iyi olduğu belirlenmiştir.

Dharkar ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2021), terpolimerik ligand melamin-anilin-formaldehit (MAF), reaksiyona giren monomerlerin 1:2:4 molar oranlarında bir asit katalizör varlığında melamin (M) ve anilinin (A) formaldehit (F) ile kondenzasyonuyla sentezlenmiştir. Terpolimerik ligandın karakterizasyonu elementel analiz, IR ve ¹HNMR temel alınarak yapılmıştır. Termal bozunma eğrisi tek bir bozunma adımını göstermiştir (305-530°C). Sharp-Wentworth (21,10 kJ/mol) yöntemi ve Freeman-Carroll (21,46 kJ/mol) yöntemiyle hesaplanan termal aktivasyon enerjilerinin (E_a) iyi bir uyum içinde olduğu görülmüştür.

Kinetik parametrelerin hesaplanmasında Freeman- Carroll ve Sharp -Wentworth yöntemleri uygulanırken, çeşitli termodinamik parametrelerin belirlenmesinde Freeman- Carroll yöntemlerinden elde edilen veriler kullanılmıştır.

Dorieh ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2022), melamin-formaldehit reçinesinin (MF) performansının nanomalzemelere dayalı olarak genişletilmesine yönelik bir literatür taraması sunulmuştur. MF reçine ile değiştirilmiş farklı nanomalzemeler için özellik-performans ilişkileri yakından incelenmiştir. Nanomalzemeler, olağanüstü yüksek etkinlik ve termal stabilite, yangın geciktiricilik, mükemmel fiziksel-mekanik özellikler, iyi teknolojik özellikler ve biyouyumluluk nedeniyle küresel ilgi görmektedir. MF reçine yapıştırıcılar üstün yapışma özelliklerine ve suya karşı dayanıklılığa sahip oldukları için yaygın olarak kullanılmaktadır. Nanoteknoloji, polimer kompozitleri iyileştirilmiş performansla geliştirmek için büyük bir potansiyele sahiptir. Yapıştırıcılar için nanomateryalle geliştirilmiş polimerler, ahşap kompozitlerin özelliklerini geliştirmek için geliştirilmiştir. MF reçine, kaplama uygulamaları için en yaygın termoset reçinelerden biridir. Nanoteknolojiye dayanarak, kaplamalar gibi endüstriyel kullanımlara yönelik gelişmiş MF reçine bazlı polimerler tasarlamak mümkündür. Bu kritik incelemede, ilk kez, MF reçine yapıştırıcıların mekanik özellikleri, termal stabilitesi, yangın geciktiriciliği ve serbest formaldehit emisyonu gibi performansının iyileştirilmesinde nanomalzemelerin etkisi üzerindeki son gelişmelerin önemi ve MF reçine yapıştırıcılarının çeşitli yönleri vurgulanmıştır. Sıvı MF reçine yapıştırıcılarda nanopartiküllerin kullanılması, çevre ve sağlık tehlikelerini önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahiptir. Sonuç olarak, gelecekteki iyileştirmelere ilişkin zorluklar ve perspektifler, MF reçinelerinde olup bitenlerin üst düzey analizine ve kaplama endüstrisine ilişkin araştırmalarda gerçekte net olmayan nanomalzeme çalışmalarına yönelik yeni bir vizyonun gerekliliği vurgulanmıştır. Endüstriyel kullanıma yönelik MF reçine nanokompozitlerini sentezlemek için, bu nanokompozitlerin işlenmesi laboratuvar ölçeğinden endüstriyel olarak uygun yaklaşımlara kadar geliştirilmelidir.

Merline ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2013), melamin formaldehit (MF) reçinesi, 1:3 melamin/formaldehit molar oranıyla tetrahidrofuran ortamında alkali koşullar altında melamin ve formaldehitin reaksiyonuyla sentezlenmiştir. Sentezlenen reçineler, diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC), Fourier infrared spektroskopisi (FT-IR) ve termal gravimetrik analiz (TGA) ile karakterize edilmiştir. Kürleşme ve reaksiyon mekanizması termal ve spektroskopik analizlerle incelenmiştir. DSC analizinde, iki aşamalı bir çapraz bağlama reaksiyon prosesinin TGA analiziyle korele olduğunu gösteren iki ekzotermik tepe noktası gözlenmiştir. Farklı sıcaklıklardaki FT-IR çalışmaları, DSC verileriyle uyumlu olan iki aşamalı

kürleşme mekanizmasını açıklamıştır. 140-160°C sıcaklık aralığında, çapraz bağlanma reaksiyonunda tersinir demetilolasyon hakimdir. 160°C'nin üzerindeki sıcaklıkta çapraz bağlanma reaksiyonu hakimdir. DSC ve FT-IR verilerine dayanarak olası bir çapraz bağlanma reaksiyon yolu türetilmiş ve açıklanmıştır. Kürlemenin ilk aşaması, metilol gruplarının birincil amine dönüştürülmesidir ve ikinci aşama, metilol gruplarının nihai ürün olan metilen köprülerine çapraz bağlanmasıdır. Metilol gruplarının, metilen köprülerinin ve triazin halkasının termal stabilitesinin yanı sıra kürlemenin farklı aşamalarında atıkların buharlaşması da laboratuvar ölçeğinden endüstriyel olarak uygun yaklaşımlara kadar birleştirilmiş TGA ve DSC sonuçlarına dayalı olarak tartışılmıştır.

Girods ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2008), düşük sıcaklıktaki piroliz (523-573 K) yoluyla ahşap levha atıklarından azotun uzaklaştırılması iki analitik yöntemle araştırılmıştır. Ahşap panelin ve bileşenlerinin (ahşap, UF ve MF reçineleri) termal davranışının kinetik çalışması, ahşap panel atıklarından termal olarak azotun uzaklaştırılmasının uygulanabilirliğini göstermektedir. Aslında ahşabın bozunması ile ilgili sıcaklık aralığı, UF ve MF reçinenin bozunması için elde edilenden farklıdır. İzotermal koşullar, ahşap panelin ve bileşenlerinin bozulmasına yönelik kinetik bir modelin belirlenmesine olanak tanıyarak ve ahşap panelin termal davranışının, bileşenlerinin davranışının toplamının yansıması olmadığını göstermektedir. Gaz ürünlerinin FT-IR analizi, azotun termal olarak uzaklaştırılmasının fizibilitesini doğrular ve optimum arıtma koşullarının (sıcaklık/süre) değerlendirilmesine olanak sağlar. Muamele edilen numunelerin termal analizi ve düşük ısıtma değerlerinin incelenmesi, azot giderimi ve enerji geri kazanımı açısından ısı işlemin verimliliğinin ölçülmesini sağlar. Sonuçlar, başlangıçtaki azotun yaklaşık %70'inin atıktan uzaklaştırılabildiğini ve arıtma sıcaklığının (523 K ile 573 K arasında) azot giderme açısından verimliliği etkilemediğini göstermektedir. Bununla birlikte, enerji/başlangıç enerjisi oranı (%76 ila %90 arasında) en düşük arıtma sıcaklığıyla iyileştirilmelidir.

Despres ve Pizzi'nin yaptığı çalışmada (2006), koloidal parçacık oluşumunun ardından kümelenmelerinin, aminoplastik reçinelerin, yani üre-formaldehit (UF) reçineleri, melamin-formaldehit (MF) reçineleri ve melamin-üre-formaldehit (MUF) reçinelerinin yaşlanmasının normal yolu olduğu gösterilmiştir. Reçinenin eskimesi veya daha uzun kondenzasyon süreleri gibi başka yollarla daha da ilerletilmesi reçinenin beyazlamasına neden olmaktadır. Bu hem koloidal parçacıkların oluşumunun hem de kümelenmelerinin makroskobik bir göstergesidir. Sonunda çoğunlukla koloidal, kümelenmiş olarak reçinelere doğru ilerler ve bunu çok daha sonra tüm reçineyi kapsamaya başlayan bir üstküme oluşumu izler. UF reçineleri tarafından oluşturulan ilk filament benzeri koloidal agregatlar, MF reçineleri tarafından oluşturulan

küresel olanlardan farklı bir görünüme sahiptir. MUF reçineleri, ikisi arasında kısa çubuk benzeri bir görünüm melezi sunar. MF reçinelerinin kolloidal küreciklerinde görülebilen yıldız benzeri yapılar, muhtemelen reçinelerdeki erken kolloidal yapıların ışık girişim modellerini oluşturmaktadır. Bu yıldız benzeri girişim desenleri, reçinenin yaşlanması veya reçinenin daha karmaşık agregatlara doğru ilerlemesi nedeniyle daha karmaşık hale gelir ve sonunda filaman benzeri ve çubuk benzeri yapıların ortaya çıkmaya başladığı aşamaya ulaşılır. Bir sonraki adım, fiziksel katılaşmanın gerçek başlangıcını temsil eden küresel kütlelerin oluşmasıdır.

Kandelbauer ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2010), mevcut katkı kapsamında, yeni bir melamin-üre-formaldehit reçinesi (MUF) formülasyonu kullanılarak kâğıt laminatlar üzerinde yapılan teknolojik testlerin son sonuçları raporlanmakta ve performansları MF'den yapılan geleneksel yüzeylerle karşılaştırılmaktadır. Dekoratif laminat endüstrisi oldukça rekabetçi bir endüstriyel sektördür. Yüzeyi lamine MDF ve yonga levhalara yönelik emprenyeli kâğıt üreticilerinin kârlı olabilmek için üretim maliyetlerini önemli ölçüde azaltmaları gerekmektedir. Melamin formaldehit köpüğü (MF) formülasyonları, bu tür kâğıtların emprenye edilmesi ve kaplanması için yaygın olarak kullanılır; melamin, yüksek miktarlarda kullanılan önemli ancak maliyetli bir hammaddedir. Çekirdek emprenyesinde MF daha ucuz üre formaldehit reçineleri (UF) ile değiştirilirken, kâğıt yüzey filmleri için saf MF kullanılmaktadır. Bu nedenle, yüzey filmindeki melaminin bir kısmının üre ile değiştirilmesi durumunda maliyette daha fazla azalma sağlanabilmektedir.

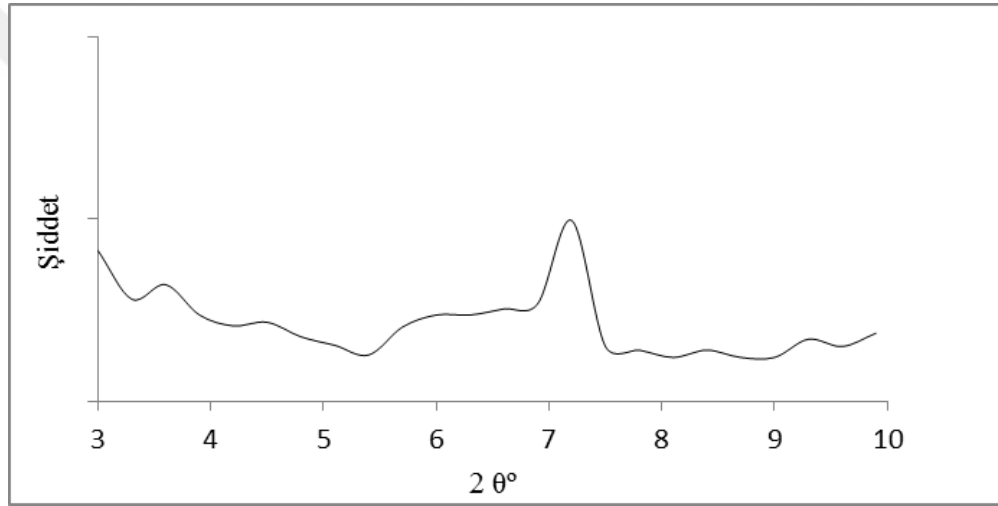
Çalışmanın Amacı

Melamin formaldehit (MF) yüksek alevlenme ve sıcaklık dayanımı gösteren sert, çok dayanıklı ve çok yönlü bir reçinedir. Melamin ve formaldehit gibi iki başlangıç maddesinin kondensasyonu ile sentezlenen MF reçineleri, yanarken azot gazı salınımı yaptıklarından, iyi bir alev geciktirici özelliğe sahiptir. MF nano kompozitlerinin mekanik, termal ve bariyer özelliklerinin arzu edilen düzeyde olmadığı literatürde vurgulanmaktadır. Bu özelliklerin çeşitli yöntemlerle iyileştirilmesi nano kompozitlerin kullanım alanı açısından büyük önem arz etmektedir. Bu konuda literatürde önemli bir boşluğun bulunduğu söylenebilir. Bu bilgilerin ışığında sunulan çalışmada; nanokil takviyeli, çapraz bağlı MF, MUF ve MAF nano kompozitlerinin ve çeşitli hibrit kompozitlerin mikrodalga ısınlama tekniği ile sentezlenmesi ve bu kompozitlerin termal, mekanik ve morfolojik özelliklerinin incelenmesi amaçlanmaktadır. Mikrodalga ısınlama tekniği sayesinde daha uzun sürede gerçekleşen polimer sentezi daha kısa sürede gerçekleştirilmektedir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Materyal

Bu çalışmada hibrit nanokompozitlerin hazırlanmasında birincil dolgu maddesi olarak kullanılan toz pomza Nevşehir’de bulunan Blokbims firmasından temin edilmiştir. Bursa Lazoğlu A.Ş.’den satın alınan kaolin kili deneylerde kullanılmıştır. İkincil dolgu maddesi olarak ağırlıkça %12,5 oranında ticari alçı, içi boş mikro cam küreler (HMGS, çapları 100-800 mikrometre) kullanılmıştır. Ayrıca nano dolgu maddesi olarak kullanılmak üzere organo Montmorillonit (OMMT) hazırlamak için Çankırı Karakayalar A.Ş.’den temin edilen ham montmorillonit kili (MMT) kullanılmıştır. Kullanılan kil örneğinin XRD difraktogramı Şekil 22’de, pomza, kaolin ve MMT’nin minerolojik bileşimleri ise Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 22. Kil örneğinin XRD difraktogramı.

Bu şekilde verilen difraktogramdaki, $2\theta=7,19^\circ$ ’de görülen pik (d mesafesi 1,23 nm), smektit grubu 2:1 tabakalı yapıya sahip MMT’in karakteristik pikini yansıtmaktadır (Jiang *et al.* 2006; Korucu 2010).

Tablo 1. Pomza, Kaolin ve Montmorillonit X-Işınlari Floresans Spektrometresi (XRF) Kimyasal Bileşimleri

	Bileşim (%)											
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	MnO	SrO	SO ₃	Diğer
Pomza	73,35	12,88	0,77	0,08	1,10	4,40	3,82	0,08	0,05	0,01	0,44	3,02
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	Diğer		
Kaolin	71,0	20,0	0,40	0,05	0,15	0,10	0,35	0,50	0,03	7,92		
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	SO ₃	Diğer		
Montmorillonite	59,32	17,19	5,95	3,63	2,21	1,68	0,97	0,74	0,51	7,81		

Kompozit matris olarak kullanılan melamin formaldehit köpüğünün sentezi için, melamin ve formaldehit (%37) ve ayrıca kapsülleme için kullanılan iyonik olmayan yüzey aktif madde, Tween 80 ve analitik sınıfta Gliserin, Merck ‘den ve ayrıca izooktan, bütan ve 3-etiltoluenin karışımı olan ticari benzin de yerel bir benzin istasyonundan temin edilmiştir.

Deneysel Yöntemler

Organokilin hazırlanması

Nano dolgu maddesi olarak kullanılacak organokil (OMMT), katyonik yüzey aktif madde, Setil trimetil amonyum bromür (CTAB) (Merck), hidrokarbon malzemesi (Tablo 2) ve montmorillonit kullanılarak çözelti interkalasyon yöntemiyle hazırlandı. Bunun için öncelikle 40°C sıcaklıkta 160 mg/L konsantrasyona karşılık gelen CTAB miktarı eklenerek sulu CTAB çözeltisi hazırlandı ve daha sonra 0,3 g/1,0 g oranında hidrokarbon malzeme ilave edildi. Elde edilen dispersiyon 50 dk⁻¹ karıştırma hızında 30 dakika boyunca mekanik olarak karıştırıldıktan sonra hidrokarbon-su dispersiyonuna yeterli miktarda ham montmorillonit (MMT) ilave edildi ve 200 dk⁻¹ karıştırma hızında 30 dakika boyunca karıştırılmaya devam edildi. Son olarak karışım süzüldü ve 110°C’de 2 saat kurutuldu, öğütüldü ve ASTM (American Society for Testing and Materials International) standardında 200 mesh elekten geçirildi ve daha sonra kapalı bir kapta saklandı (Singla *et al.* 2012; Gürses and Şahin 2023).

Tablo 2. Hidrokarbon Malzemenin Bazı Özellikleri

Yoğunluk (15°C), kg/m ³	Kalorifik değer MJ/kg	Alevlenme Sıcaklığı °C	Damıtma ile bulunan (ağırlıkça%)	C	H	N	S	Kül
990,7	42,74	105,8	0,1	83,4	11,9	0,8	1,5	0,03

Melamin formaldehit önpolimeri (MF) ve MF-organokil nanokompozitlerin hazırlanması

Melamin ve formaldehit (ağırlıkça %37) (kütle oranları: 0,67:0,33), termometre ve soğutma ekipmanının bağlı olduğu üç boyunlu dibi düz bir balona yerleştirildikten sonra manyetik karıştırıcıyla karıştırıldı ve ardından yaklaşık 60°C’de çözünme gerçekleşene kadar geri soğutucu altında ısıtıldı. pH, ağırlıkça %40’lık NaOH çözeltisi ile 8,5’e ayarlandı. Karışımın viskozitesi dikkate alınarak yaklaşık 95°C’de 60 dakika boyunca geri soğutucu altında ısıtıldı. Daha sonra, elde edilen ön polimere belirli bir miktarda konsantre asetik asit, ağırlıkça %1,0 gliserin ve Tween 80’in yanı sıra ağırlıkça %6,0 benzin ilave edildi ve karışımı homojenleştirmek için mekanik olarak kuvvetli bir şekilde karıştırıldı. Ayrıca, işlenmemiş melamin formaldehit köpüğü (MF) hazırlanırken, aynı işlemler yalnızca melamin ve formaldehit (ağırlıkça %37) kullanılarak gerçekleştirildi (kütle oranları: 0,68:0,32). MF-organokil nanokompoziti yerinde sentez yoluyla hazırlanırken kap içerisine ağırlıkça %0,1, %0,15 ve %0,45 oranında organokil ilave edildi. Köpük sentezi için karışım uygun bir kap içerisinde mikrodalga fırında 2 dakika boyunca mikrodalga radyasyonuna maruz bırakıldı. Son olarak karışım, hacmi 10,0x10,0x1,0 cm³ olan modüler kare alüminyum kalıba yerleştirildi ve su ve artık formaldehitin uzaklaştırılması ve işlemin tamamlanması için sıcak hava ısıtmalı fırında 140°C’de 1 saat ısıtılma tabii tutularak kürlendirildi (Santos *et al.* 2021). İşlenmemiş MF köpük, MF-organokil nanokompozit köpüklere karşılık gelen kodlar ve bileşen oranları Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. Saf Melamin Formaldehit Köpük (MF) ve MF-organokil Nanokompozit Köpüklerin (MAFKNK1-3) Örnek Kodları ve İçerikleri

Örnek Kodları	Nano Dolgu Maddesi	(%ağırlık)
MF (Melamin formaldehit köpük)	-	-
MAFKNK1 (Melamin formaldehit organokil köpük)	Organokil	0,10
MAFKNK2 (Melamin formaldehit organokil köpük)	Organokil	0,15
MAFKNK3 (Melamin formaldehit organokil köpük)	Organokil	0,45

Melamin üre formaldehit ön-polimeri (MUF) ve MUF-organokil nanokompozitlerinin hazırlanması

Melamin, formaldehit (ağırlıkça %37) ve üre (kütle oranları: 0,67:0,31:0,02), termometre ve soğutma ekipmanının bağlı olduğu üç boyunlu dibi düz bir balona yerleştirildi, manyetik karıştırıcıyla karıştırıldı ve ardından yaklaşık 60°C’de çözelti berraklaşana kadar geri soğutucu altında ısıtıldı. pH, ağırlıkça %40’lık NaOH çözeltisi ile 8,5’e ayarlandı. Karışımın viskozitesi dikkate alınarak yaklaşık 95°C’de 60 dakika boyunca geri soğutucu altında ısıtıldı. Daha sonra, elde edilen ön polimere belirli bir miktarda konsantre asetik asit, ağırlıkça %1,0 gliserin ve Tween 80’in yanı sıra ağırlıkça %6,0 benzin ilave edildi ve karışımı homojenleştirmek için mekanik olarak kuvvetli bir şekilde karıştırıldı. Bununla birlikte, işlenmemiş Melamin formaldehit köpüğü (MF) hazırlanırken, aynı işlemler yalnızca melamin ve formaldehit (ağırlıkça %37) kullanılarak gerçekleştirildi (kütle oranları: 0,68:0,32). MUF-organokil nanokompoziti yerinde sentez yoluyla hazırlanırken kap içerisine ağırlıkça %0,15, %0,30 ve %0,45 oranında organokil ilave edildi. Köpük sentezi için karışım uygun bir kap içerisinde mikrodalga fırında 2 dakika boyunca mikrodalga radyasyonuna maruz bırakıldı. Son olarak karışım, hacmi 10,0 x 10,0 x 1,0 cm³ olan modüler kare alüminyum kalıba yerleştirildi ve su ve artık formaldehitin uzaklaştırılması ve işlemin tamamlanması için sıcak hava ısıtmalı fırında 140°C’de 1 saat ısıtma işlemi tabi tutularak kürlendirildi (Santos *et al.* 2021). İşlenmemiş MF köpük, MUF köpük, MUF-organokil nanokompozit köpüklere karşılık gelen kodlar ve bileşen oranları Tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 4. Saf Melamin Formaldehit Köpük (MF), Saf Melamin Üre Formaldehit Köpük (MUF) ve MUF-organokil Nanokompozit Köpüklerin (MUFKNK1-3) Örnek Kodları ve İçerikleri

Örnek Kodları	Nano Dolgu Maddesi	(%ağırlık)
MF (Melamin formaldehit köpük)	-	-
MUF (Melamin üre formaldehit köpük)	-	-
MUFKNK1 (MUF organokil nanokompozit köpük)	Organokil	0,15
MUFKNK2 (MUF organokil nanokompozit köpük)	Organokil	0,30
MUFKNK3 (MUF organokil nanokompozit köpük)	Organokil	0,45

Saf MF, MUF ve MAF reçinesi, ham dolgu maddeleri ve hibrit kompozitlerin karakterizasyonu için Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR), X ışını difraksiyonu (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve yüksek çözünürlüklü geçirgenlik elektron

mikroskobu (HRTEM) analizleri yapılmıştır. Ayrıca eğilme mukavemeti, elastisite modülü, basınç dayanımı ve vida tutma direnci gibi mekanik testler ile termal iletkenlik katsayısı ölçümleri de yapılmıştır (Zhu *et al.* 2018).

Melamin anilin formaldehit ön-polimeri (MAF) ve MAF-organokil nanokompozitlerinin hazırlanması

Melamin, formaldehit (ağırlıkça %37) ve anilin (kütle oranları: 0,67:0,31:0,02), termometre ve soğutma ekipmanının bağlı olduğu üç boyunlu dibi düz bir balona yerleştirildi, içerisine 0,5g anilin ilave edildikten sonra manyetik karıştırıcıyla karıştırıldı ve ardından yaklaşık 60°C’de çözünme gerçekleşene kadar geri soğutucu altında ısıtıldı. pH, ağırlıkça %40’lık NaOH çözeltisi ile 8,5’e ayarlandı. Karışımın viskozitesi dikkate alınarak yaklaşık 95°C’de 60 dakika boyunca geri soğutucu altında ısıtıldı. Daha sonra, elde edilen ön polimere belirli bir miktarda konsantre asetik asit, ağırlıkça %1,0 gliserin ve Tween 80’in yanı sıra ağırlıkça %6,0 benzin ilave edildi ve karışımı homojenleştirmek için mekanik olarak kuvvetli bir şekilde karıştırıldı. Bununla birlikte, işlenmemiş Melamin formaldehit köpüğü (MF) hazırlanırken, aynı işlemler yalnızca melamin ve formaldehit (ağırlıkça %37) kullanılarak gerçekleştirildi (kütle oranları: 0,67:0,33). MAF-organokil nanokompoziti yerinde sentez yoluyla hazırlanırken kap içerisine ağırlıkça %10, %0,15, %20, %0,30, %40 ve %0,45 oranında organokil ilave edildi. Köpük sentezi için karışım uygun bir kap içerisinde mikrodalga fırında 2 dakika boyunca mikrodalga radyasyonuna maruz bırakıldı. Son olarak karışım, hacmi 10,0x10,0x1,0 cm³ olan modüler kare alüminyum kalıba yerleştirildi ve su ve artık formaldehitin uzaklaştırılması ve işlemin tamamlanması için sıcak hava ısıtmalı fırında 140°C’de 1 saat ısıtılma tabi tutularak kütleme yapıldı (Santos *et al.* 2021). İşlenmemiş MF köpük, MAF köpük, MAF-organokil nanokompozit köpüklere karşılık gelen kodlar ve bileşen oranları Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 5. Saf Melamin Formaldehit Köpük (MF), Saf Melamin Anilin Formaldehit Köpük (MAF) ve MAF-organokil Nanokompozit Köpüklerin (MAFKNK1-6) Örnek Kodları ve İçerikleri

Örnek Kodları	Nano Dolgu Maddesi	(%ağırlık)
MF (Melamin formaldehit köpük)	-	-
MAF (Melamin anilin formaldehit köpük)	-	-
MAFKNK1 (MAF organokil nanokompozit köpük)	Organokil	0,10
MAFKNK2 (MAF organokil nanokompozit köpük)	Organokil	0,15
MAFKNK3 (MAF organokil nanokompozit köpük)	Organokil	0,20
MAFKNK4 (MAF organokil nanokompozit köpük)	Organokil	0,30
MAFKNK5 (MAF organokil nanokompozit köpük)	Organokil	0,40
MAFKNK6 (MAF organokil nanokompozit köpük)	Organokil	0,45

Melamin formaldehit ön-polimeri (MF), MF-organokil nanokompozit ve hibrit kompozitlerin hazırlanması

1,0/1,1 oranındaki melamin ve ağırlıkça %37 formaldehit, termometre ve soğutma ekipmanı bulunan üç boyunlu dibi düz bir balona konularak manyetik karıştırıcıyla karıştırıldıktan sonra yaklaşık 60°C’de çözelti berraklaşınca kadar belirli bir süre ısıtıldı. Son olarak pH, ağırlıkça %40’lık bir NaOH çözeltisi ile 8,5’e ayarlandı. Karışımın viskozitesi dikkate alınarak yaklaşık 95°C’de 1 saat boyunca geri soğutuldu. Daha sonra, nötralizasyon için yeterli miktarda konsantre asetik asit, ağırlıkça %1,0 Gliserin ve Tween 80 ile ağırlıkça %6,0 benzin, elde edilen ön polimere ilave edildi ve homojen bir karışım elde etmek için mekanik olarak kuvvetlice karıştırıldı. Yerinde sentez ile MF-organokil nanokompoziti hazırlanırken ortama ağırlıkça %0,15 organokil ilave edildi. Hibrit kompozitler hazırlanırken sırasıyla belirli oranda pomza ve diğer dolgu maddeleri ilave edilerek karıştırmaya devam edildi. Köpürtme kapsülasyon yöntemini kullanmak için elde edilen karışım uygun bir kap içerisinde mikrodalga fırında 2 dakika boyunca mikrodalga radyasyonuna maruz bırakıldı. İç hacmi 10,0x10,0x1,0 cm³ olan modüler kare bir alüminyum kalıba alındı ve karışım, formaldehitin yanı sıra artık suyun tamamını uzaklaştırmak için sıcak havayla ısıtılan bir fırında

140°C’de 1 saat süreyle ısıtma işlemine tabi tutuldu (Santos *et al.* 2021). Çalışmada üretilen saf MF, MF-organokil nanokompozit ve MF-organokil-pomza-alçı, MF-organokil-kaolin ve MF-organokil-içi boş cam küre hibrit kompozitlerine karşılık gelen kodlar ve bileşen oranları aşağıda Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. Saf MF, MF-Organokil Nanokompozit ve MF-Organokil-Pomza, MF-Organokil-Pomza-Alçı, MF-Organokil-Pomza-Kaolin ve MF-Organokil-İçi Boş Cam Küre Hibrit Kompozitlerin Kodları ve Bileşen Oranları

Örnek Kodları	Nano Dolgu Maddesi	(%Ağırlık)	Birincil Dolgu Maddesi	(%Ağırlık)	İkincil Dolgu Maddesi	(%Ağırlık)
MF (Melamin Formaldehit köpük)	-	-	-	-	-	-
MFKNK (Melamin Formaldehit Organokil Nanokompozit)	Organokil	0,15	-	-	-	-
MFKPHK (Melamin Formaldehit-Organokil-Pomza-Hibrit Kompozit)	Organokil	0,15	Pomza	44,4	-	-
MFKPAHK (Melamin Formaldehit-Organokil-Pomza-Alçı-Hibrit Kompozit)	Organokil	0,15	Pomza	38,9	Alçı	5,5
MFKPKHK (Melamin Formaldehit-Organokil-Pomza-Kaolin-Hibrit Kompozit)	Organokil	0,15	Pomza	38,9	Kaolin	5,5
MFKPCHK (Melamin Formaldehit-Organokil-Pomza-Cam küre-Hibrit Kompozit)	Organokil	0,15	Pomza	38,9	Cam küre	5,5

Dokusal, Yapısal, Mekanik ve Termal Analizler

Spektroskopik analiz

Bu çalışmada melamin-formaldehit nanokompozit (MF), melamin formaldehit-organokil kompozitler (MFK), melamin üre formaldehit-organokil kompozitler (MUF), melamin anilin formaldehit-organokil kompozitlerin (MAF) ve hibrit kompozitlerin spektroskopik olarak XRD ve FT-IR analizleri yapılmıştır.

Fourier dönüşümlü infrared spektroskopisi (FT-IR) analizi

Ham kil, organokil, mineral dolgular ve hibrit kompozitlerin FT-IR spektrumları, fonksiyonel gruplarını belirlemek için Vertex 70 V FT-IR spektrometresi kullanılarak 4000 ila 400 cm^{-1} aralığında ve 1 cm^{-1} çözünürlükte ortalama 100 tarama ile alınmıştır.

X-ışını difraksiyonu (XRD) analizi

Montmorillonit gibi katmanlı killerde, hazırlanan kompozitin tipini belirlemek için katmanlar arası mesafenin değişimi dikkate alınır (Vaia *et al.* 1997). Bileşenlerin kristal yapılarındaki deformasyonları incelemek amacıyla, sabit organokil oranına sahip, değişen oranlardaki mineral dolgular kullanılarak hazırlanan hibrit kompozitlerin XRD kırınımaları, Cu Ka (1.540Å) ile 2 θ 9–90° aralığında ve 4/dakika tarama hızında, 5 kV ve 40 mA’da çalışan PANalytical Empyrean X-ışını Difraktometresi kullanılarak alınmıştır.

Morfolojik analiz

Bu çalışmada melamin formaldehit nanokompozit (MF), melamin formaldehit-organokil kompozitler (MFK), melamin üre formaldehit-organokil kompozitler (MUF), melamin anilin formaldehit/organokil kompozitlerin (MAF) ve hibrit kompozitlerin morfolojik ve dokusal analizleri optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu ve yüksek çözünürlüklü geçirimli elektron mikroskobu ile yapılmıştır.

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi

Organokil, polimer matris ve mineral dolgular ile polimer matris ve kapsüllenmiş parçacıklar arasındaki yapışma etkileşimleri nedeniyle kompozitlerde oluşabilecek morfolojik değişiklikleri gözlemlmek ve değerlendirmek amacıyla ham kil, organokil, mineral dolgular ve hibrit kompozitlerin SEM görüntüleri 30 kV’de taramalı elektron mikroskobu (SEM) (FEI-INSPECT S50 modeli) kullanılarak alınmıştır.

Yüksek çözünürlüklü geçirimli elektron mikroskobu (HRTEM)

HRTEM analizi, malzemelerin dokusal yapılarının nano ölçekte incelenmesinde ve özellikle nanokompozitlerdeki nanopartiküllerin dağılımının incelenmesinde büyük önem taşımaktadır (Günister Canbaz 2008). Bu çalışmada, 120,0 kV'da çalışan HITACHI HT7700 yüksek çözünürlüklü transmisyon elektron mikroskobu (LaB6 filamentli) kullanılarak dokusal yapılarını karakterize etmek amacıyla ham kil, organokil, mineral dolgular ve hibrit kompozitlerin HRTEM görüntüleri alınmıştır.

Mekanik Testler

MF-organokil nano-kompozit ve hibrit kompozitlerin vida tutma testleri ve eğilme (eğilme ve elastikiyet modülü) testleri, universal test cihazı (Zwick/Roell) kullanılarak sırasıyla ASTM (1037-16) ve ASTM (D790) standartlarına göre gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, MF köpüğün, MF-organokil nanokompozit köpüğün, MUF köpüğün, MUF-organokil nanokompozit köpüğün, MAF köpüğün, MAF-organokil nanokompozit köpüğün basınç dayanımı, DIN ISO 844: 2009-10 standardına göre universal test cihazı (Zwick/Roell) kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Razaghi *et al.* 2007; Sever *et al.* 2019).

Isı İletim Katsayısı Ölçümü

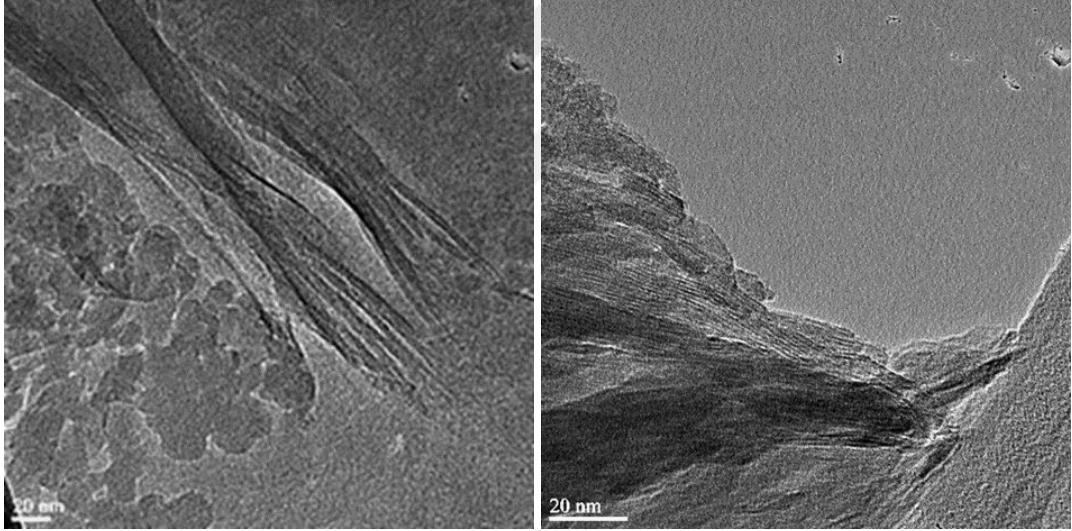
Isıl iletkenlik katsayısı, lambda (λ), bir malzemenin fiziksel ve kimyasal yapısına bağlı olarak o malzemenin ısıyı ne kadar ilettiğini ifade eder. Isıl iletkenlik katsayısı W/mK birimi, ısı yalıtım malzemesinin birbirine dik 1 m mesafedeki, 1 m²'lik yüzeyi arasından, sıcaklık farkı 1°C olduğunda geçen ısı miktarıdır. Çeşitli izolasyon malzemeleri, seramik, tuğla, plastik ve beton gibi ısı iletim katsayısı düşük malzemelerin ısı iletim katsayılarının ölçümünde kullanılır. Bu çalışmada melamin formaldehit nanokompozit (MF), melamin formaldehit/organokil kompozitler (MFK), melamin üre formaldehit/organokil kompozitler (MUF) ve melamin anilin formaldehit/organokil kompozitler (MAF) ve hibrit kompozitlerin ısı iletim katsayıları, ısı iletim katsayısı ölçme cihazı olan KEM QTM 500 cihazı ile ölçüm aralığı: 0.023-11.63 W/mK, ölçüm hassasiyeti: %5, -10 ile +200°C sıcaklık aralığında ve minimum örnek boyutu 120x60x20 mm olacak şekilde yapılmıştır.

ARAŞTIRMA BULGULARI

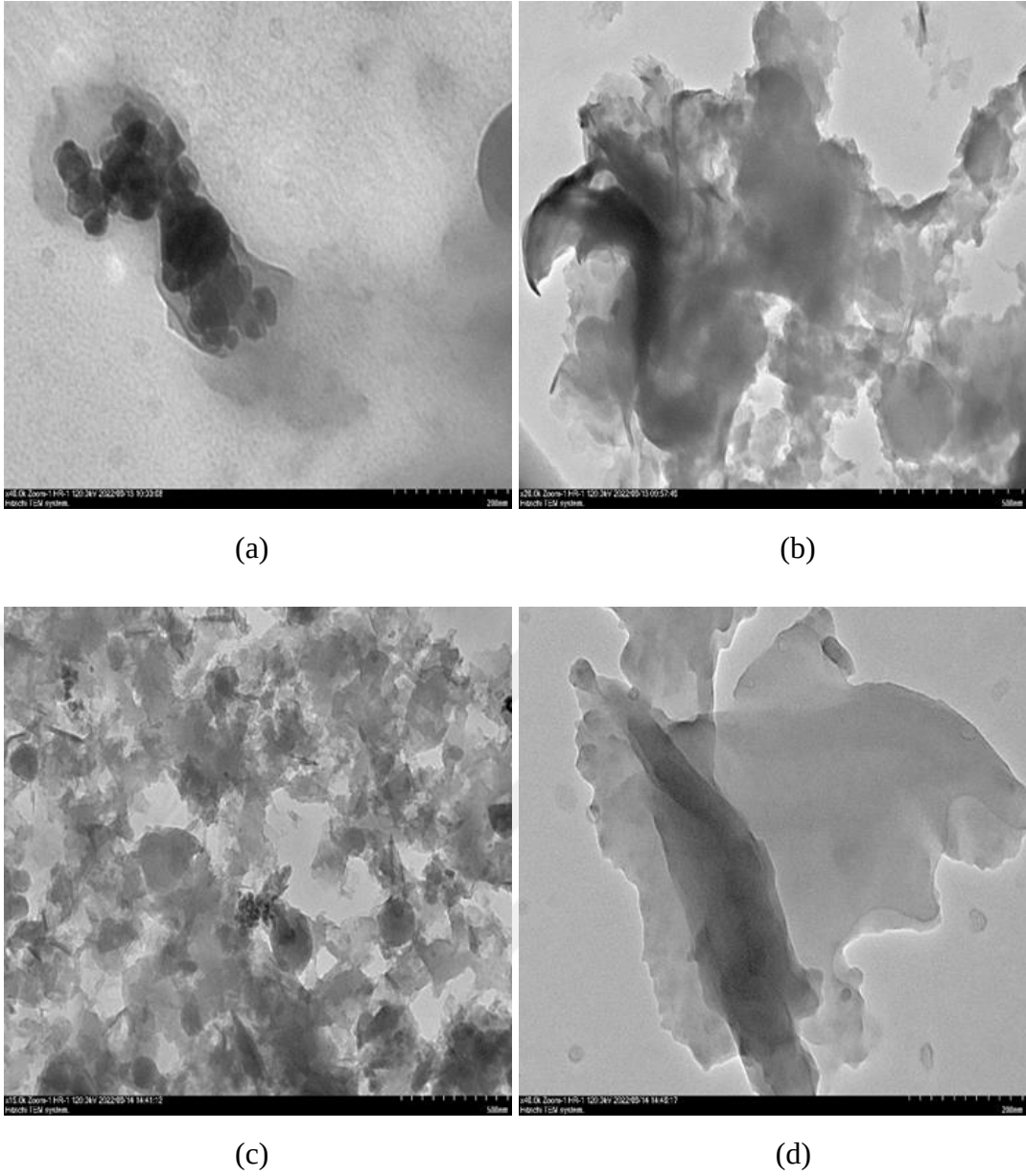
Melamin Formaldehit Köpük (MF) ve MF-Organokil Nanokompozitlerine Ait Bulgular

Melamin formaldehit köpük (MF) ve melamin formaldehit organokil nanokompozitlerinin (MFKNK) dokusal karakterizasyonu

Ham montmorillonit (MMT) ve organo-montmorillonitin (OMMT) dokusal yapılarındaki farklılıkları karşılaştırmak ve yapılan modifikasyonun etkinliğini görmek amacıyla sırasıyla her ikisinin de HRTEM görüntüleri alınmış ve Şekil 23'te verilmiştir. HRTEM görüntülerinde görülen koyu uzun lifli çizgiler, 2:1 katmanlı yapılarıyla kil tabakalarını işaret etmektedir. Melamin formaldehit (MF) köpük (a) ve değişen organokil oranları içeren melamin formaldehit-organokil köpüklere (MFKNK1-3 (b-d)) ait HR-TEM görüntüleri Şekil 24'te verilmiştir.



Şekil 23. Ham montmorillonit (MMT) (a), Organo-montmorillonit (OMMT) (b)'nin HRTEM görüntüleri

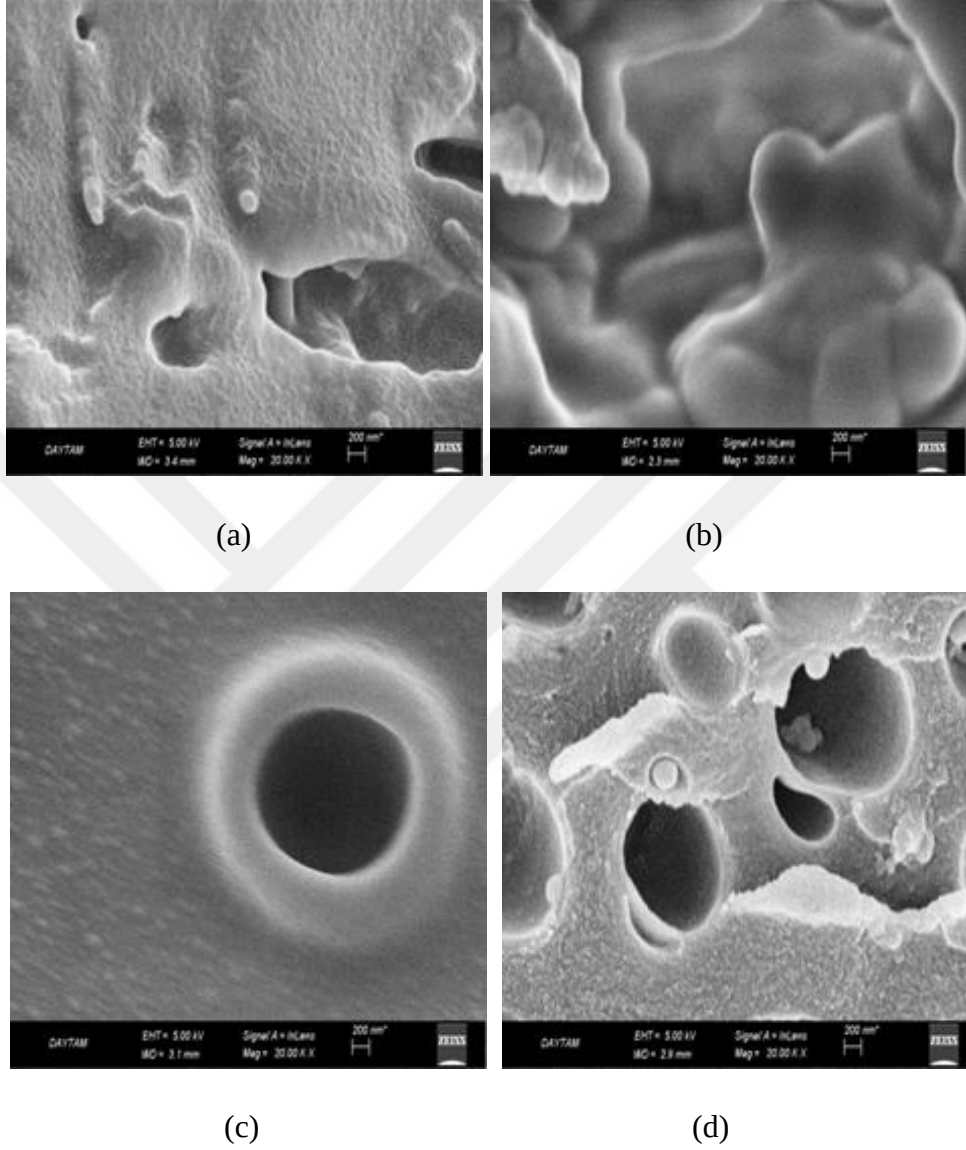


Şekil 24. Melamin formaldehit (MF) köpük (a) ve değişen organokil oranları içeren melamin formaldehit-organokil köpüklere (MFKNK1-3 (b-d)) ait HR-TEM görüntüleri

Şekil 24a'dan, saf melamin formaldehit reçinesinin bir araya toplanmış mikroküreler halinde olduğu ve agregatların üç boyutta geliştiği görülebilmektedir (Naresh *et al.* 2022). Bu dokusal düzenleme, sertleşmeden önce mikrodalga ışınlama destekli köpükleştirme yönteminin kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 24b, organokil tabakalarının polimer matriks içine pul pul dağılmasından dolayı, MF molekülü kümelerinin küresel yapılarını koruyarak düzenli olarak seyrekleştiğini veya ayrıştığını göstermektedir (Gürses ve Şahin, 2023). Kil miktarı arttıkça MF molekülünün küresel yapılarının iyice ayrıştığı görülmektedir (Şekil 24c ve 24d).

Melamin formaldehit köpük (MF) ve melamin formaldehit organokil nanokompozitlerinin (MFKNK) yüzey morfolojik karakterizasyonu

Saf melamin formaldehit reçine köpüğü (MF) ve MF-organokil nanokompozitler (MFKNK1-3) için alınan SEM desenleri Şekil 25'te verilmiştir.

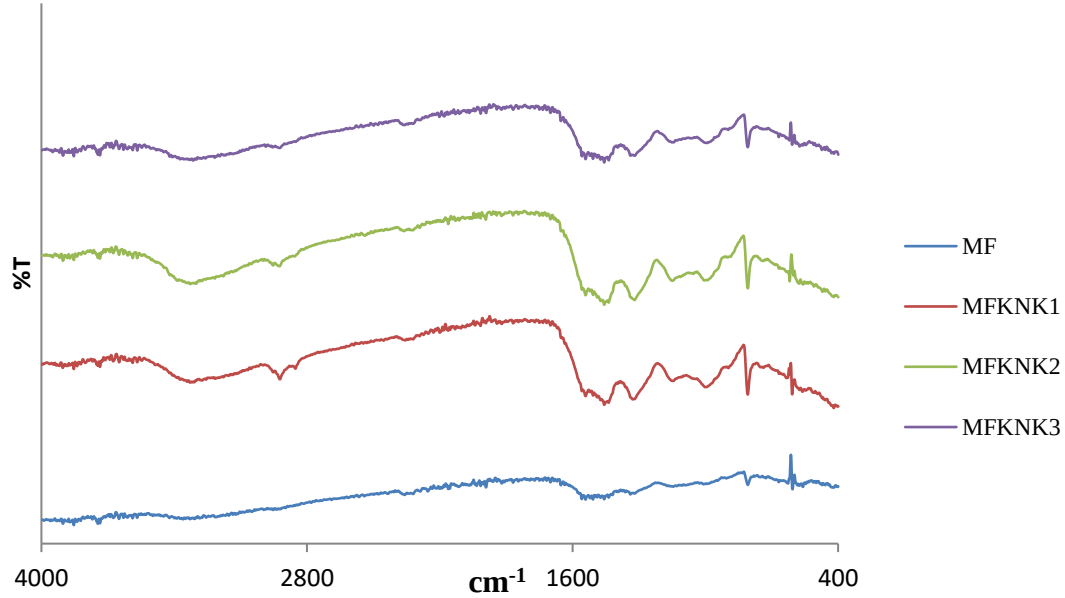


Şekil 25. Saf melamin formaldehit reçinesi (MF) (a), farklı kil oranları içeren MF-organokil nano-kompozitlerin (MFKNK1-3) (b-d) SEM desenleri.

Şekil 25a'nın, saf melamin formaldehit reçine (MF) modelinin, mikroküre kümelerinin üç boyutlu dallanmış yapılar olarak geliştiğini gösteren yüzey morfolojisini açıkça yansıttığı görülebilir (Gao *et al.* 2020; Nemanič *et al.* 2014). Şekil 25b, organokil tabakalarının polimer matris içine pul pul dökülmesinden dolayı küresel yapılarını koruyarak, dallanmış yapının neredeyse kaybolduğu ve MF molekül kümelerinin düzenli istiflenmesini gösteren bir yüzey morfolojisini ortaya koymaktadır. Şekil 25c ve 25d'de ise artan kil miktarıyla dallanmış yapının tamamen kaybolduğu görülmektedir.

Melamin formaldehit köpük (MF) ve melamin formaldehit organokil nanokompozitlerinin (MFKNK) FT-IR spektrumlarının analizi

Saf melamin formaldehit reçinesinin (MF) ve MF-organokil nanokompozitlerinin FT-IR spektrumları Şekil 26'da verilmiştir.

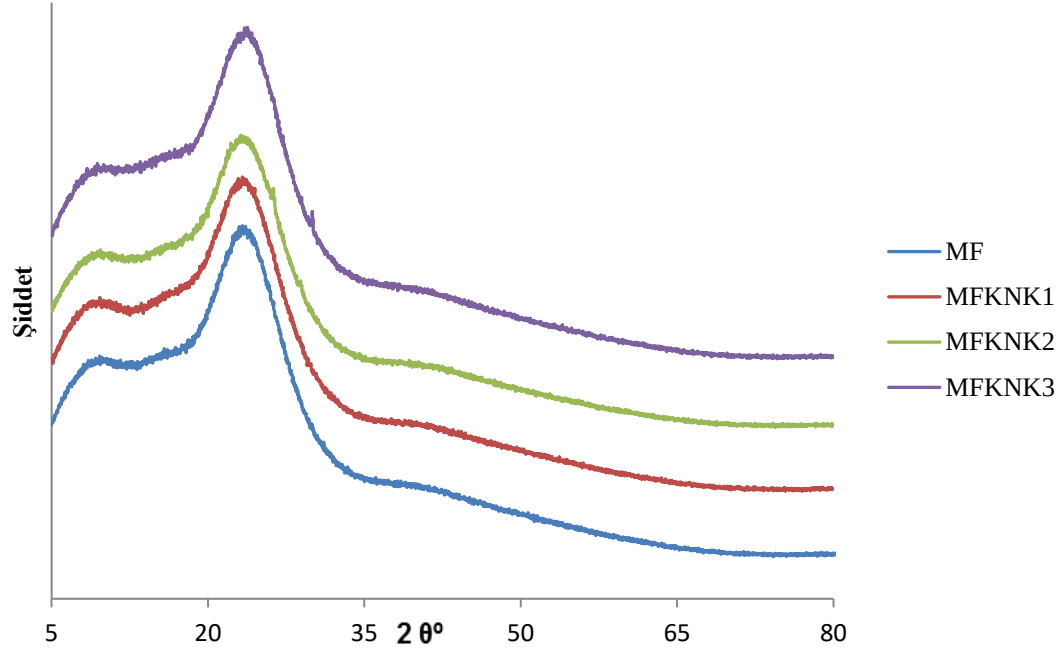


Şekil 26. Saf melamin formaldehit köpük ve farklı kil oranları içeren MF-organokil nanokompozitlerinin (MFKNK1-3) FT-IR spektrumları.

Şekil 26'da MF-organokil nanokompozitinin (MFKNK) FT-IR spektrumunda, Su kaynaklı hidroksil grubundan 3354 cm^{-1} 'deki güçlü pikin dışında, 2926 , 2914 ve 2881 cm^{-1} 'de üç tepe daha ortaya çıkmıştır ki bunlar ikincil amin grubu gerilme, C-H anti-gerilme ve C-H gerilme titreşimlerine ait pikleridir (Chen *et al.* 2015). Tüm bu spesifik pikler, kil katmanları ve uzun zincirli hidrokarbon molekülleri tarafından bağlanan CTA^+ iyonları arasındaki etkileşimler nedeniyle hem daha düşük yoğunlukta ortaya çıkmakta hem de daha düşük değerlere kaymaktadır. Ayrıca CTAB'ün C-N gerilmesine ve N-H bükülmesine karşılık gelen sırasıyla 1454 cm^{-1} ve 1129 cm^{-1} 'de iki pik gözlemlendi. Öte yandan $1302\text{--}1657\text{ cm}^{-1}$ bölgesinde ortaya çıkan piklerin CH_2 kayma titreşim modu ve bağlı baş grup etrafındaki su molekülünün O-H bükülme modundan kaynaklandığı iddia edilebilir. Si-O ve Al-OH, 1000 cm^{-1} ila 500 cm^{-1} aralığında gözlenen ana fonksiyonel gruplardır. 866 cm^{-1} 'deki pik Al-OH bükülme titreşimlerine karşılık gelirken, 802 cm^{-1} 'de SiO_2 'deki çift Si-O-Si bağları ve $714\text{--}617\text{ cm}^{-1}$ civarında gözlenen Si-O gerilme titreşimleri kuvarsın varlığına işaret etmektedir. Karakteristik piklerin düşük yoğunlukta ve spesifik değerlerinden kaymış olarak ortaya çıkması, kil plakaları ile uzun zincirli hidrokarbona bağlı CTA^+ iyonları arasındaki yoğun etkileşimlerin göstergesi olabilir (Gürses *et al.* 2015; Wanyika *et al.* 2016).

Melamin formaldehit köpük (MF) ve melamin formaldehit organokil nanokompozitlerinin (MFKNK) mineralojik yapılarının karakterizasyonu

Şekil 27, saf melamin formaldehit köpüğün (MF) ve farklı kil oranları içeren MF-organokil nanokompozitlerinin (MFKNK) XRD kırınımlarını göstermektedir.



Şekil 27. Saf melamin formaldehit köpüğü ve farklı kil oranları içeren MF-organokil nanokompozitlerinin (MFKNK1-3) XRD difraktogramları.

Şekil 27, MF köpüğünün XRD deseninde, amorf bir yapıya işaret eden, $9,4^\circ$ ve $23,8^\circ$ 'de iki tipik geniş tepe noktasının ortaya çıktığını göstermektedir. Bu, melaminin formaldehit reçinesinin metilol monomerlerinden oluştuğu ve polimerik omurganın yayılımının gerçekleştiği anlamına gelir. Şekil 28'de, MF reçinesinin iki zirvesinden küçük olanının, $8,1^\circ$ 'deki karakteristik smektit zirvesiyle kısmen örtüştüğü görülebilmektedir (Gürses *et al.* 2015; Yu *et al.* 2014). Bu sola kaymış ve büyümüş smektit piki, polimer moleküllerinin kilin ara katman boşluğuna girebildiğini ve nanokompozitin oluştuğunu açıkça göstermektedir. Şekil 24b'deki HRTEM görüntüsü de bu iddiayı desteklemektedir.

Melamin formaldehit köpük (MF) ve melamin formaldehit organokil nanokompozitlerinin (MFKNK) ısı iletkenlikleri

Isıl iletkenlik, bir malzemenin sabit koşullar altında ısı performansını değerlendirmek için önemli bir göstergedir. Malzemelerin ısı yalıtım performanslarının değerlendirilmesinde farklı numuneler için ölçülen ısı iletkenlik katsayıları dikkate alınmıştır (Amaral *et al.* 2017). Bu çalışmada ana matris ve bağlayıcı olarak melamin formaldehit reçinesi ve organokil kullanılarak hazırlanan nano kompoziti kullanılmıştır.

Saf melamin formaldehit köpük (MF) ve farklı oranlarda kil içeren MF-organokil nanokompozitlerinin (MFKNK1-3) termal iletkenlik katsayıları Tablo 7’de gösterilmektedir.

Tablo 7. Saf Melamin Formaldehit Reçinesi ve farklı oranlarda kil içeren MF-organokil Nanokompozitlerinin Termal İletkenliklerinin Analiz Sonuçları

Örnek Kodları	Isı İletim Katsayısı (λ) (W/m K)	Standart Sapma
MF (Melamin formaldehit köpük)	0,0826	0,0012
MFKNK1 (MF-organokil-nano kompozit)	0,0869	0,0021
MFKNK2 (MF-organokil-nano kompozit)	0,0650	0,0048
MFKNK3 (MF-organokil-nano kompozit)	0,0812	0,0036

Tablo 7 incelendiğinde MFKNK2’nin ısı iletim katsayısının en küçük olduğu görülmektedir. Bu da MFKNK2’nin yalıtım malzemelerine alternatif olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Melamin formaldehit köpük (MF) ve melamin formaldehit organokil nanokompozitlerinin yoğunluklarının ve basma dirençlerinin bileşimlerine bağlılığı

Basınç dayanımı, bir malzemenin doğrudan basınç yükleri altına yerleştirilmesiyle ölçülen önemli bir mekanik özelliktir. Basınç dayanımı da kritik bir tasarım özelliğidir ve kompozit malzemeler, kompozit yapıya bağlı olarak bazı benzersiz basınç dayanımı davranışları sergileyebilir. Bazı malzemeler basınç dayanımının sınırında kırılır ve bazıları geri dönülemez şekilde deforme olur, dolayısıyla belirli bir miktardaki deformasyon basınç yükünün sınırı olarak kabul edilebilir. Tablo 8, saf MF köpüğün ve MF organo kil nano kompozitlerinin (MFKNK1-3) yığın yoğunluğunu ve basınç dayanımı değerlerini göstermektedir.

Tablo 8. Melamin Formaldehit Reçinesi (MF) ve Melamin Formaldehit Orgaonokil Nanokompozitlerinin Yoğunluklarının ve Basma Dirençlerinin Bileşimlerine Göre Değişimi

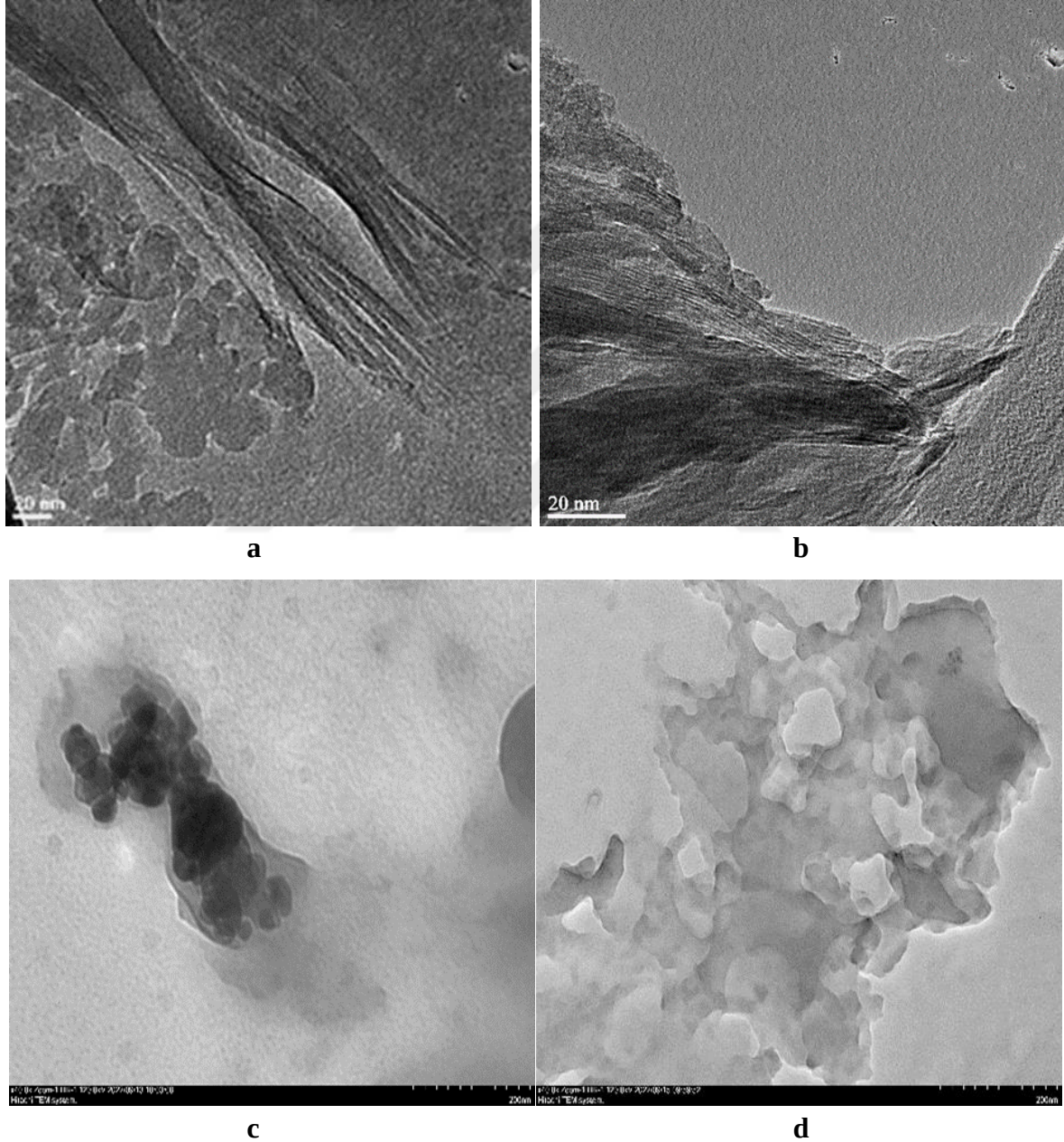
Örnek Kodları	Yoğunluk (g/cm ³)	Basma Direnci (N/mm ²)	Standart Sapma
MF	0,26	0,270	0,002
MFKNK1	0,39	0,230	0,001
MFKNK2	0,18	0,320	0,002
MFKNK3	0,20	0,680	0,007

Tablo 8 incelendiğinde MFKNK3’ün basma direncinin en büyük olduğu görülmektedir. Artan kil oranıyla basma direnci yaklaşık olarak üç katına çıkmıştır. Basınç dayanımında özellikle yüksek organokil oranında gözlenen %150’lik artma, organokil plakalarının gevrek MF köpük matrisinde iyileşen yapışma (adezyon) etkileşimlerinden dolayı süneklik artışı sağladığı söylenebilir.

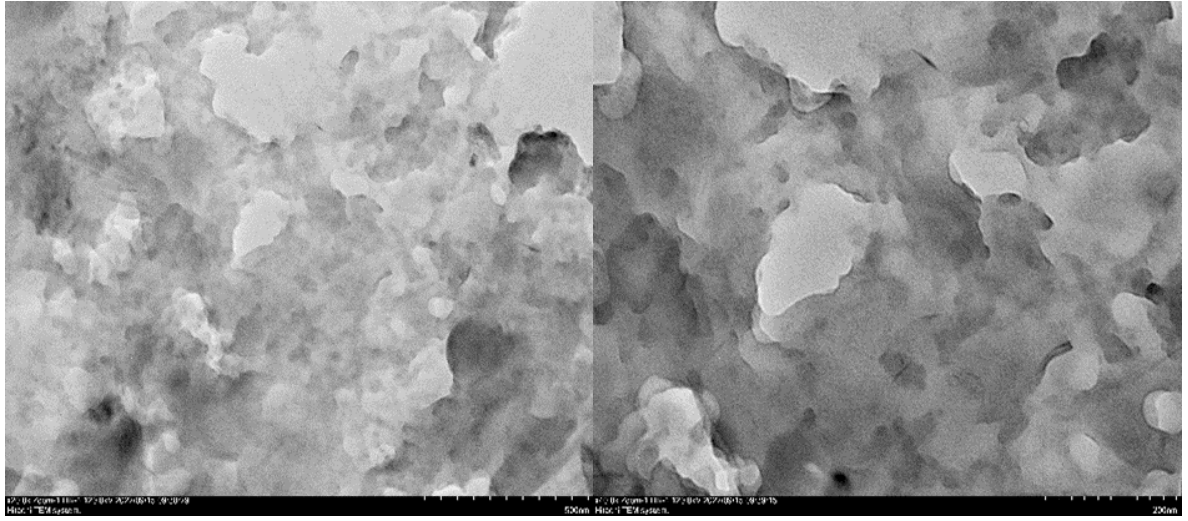
Melamin Formaldehit Köpük (MF), Melamin Üre Formaldehit Köpük (MUF) ve Melamin Üre Formaldehit Organokil Nanokompozitlerine (MUFGNK) Ait Bulgular

Melamin formaldehit köpük (MF), melamin üre formaldehit köpük (MUF) ve melamin üre formaldehit organokil nanokompozitlerinin (MUFGNK) dokusal karakterizasyonu

Ham montmorillonit (MMT) ve organo-montmorillonitin (OMMT) dokusal yapılarındaki farklılıkları karşılaştırmak için yapılan modifikasyonun etkinliğini görmek amacıyla HRTEM görüntüleri alınmış ve Şekil 28’de ve Şekil 29’da verilmiştir.

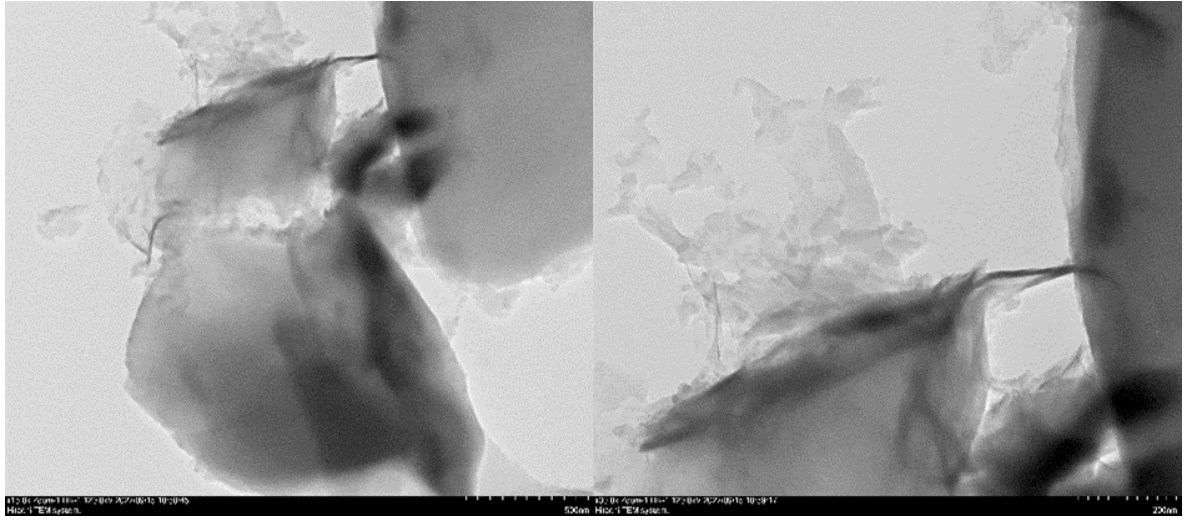


Şekil 28. Ham montmorillonit (MMT) (a), organo-montmorillonit (OMMT) (b), melamin formaldehit köpük (MF) (c) ve melamin üre formaldehit köpük (MUF) (d)’nin HRTEM görüntüleri



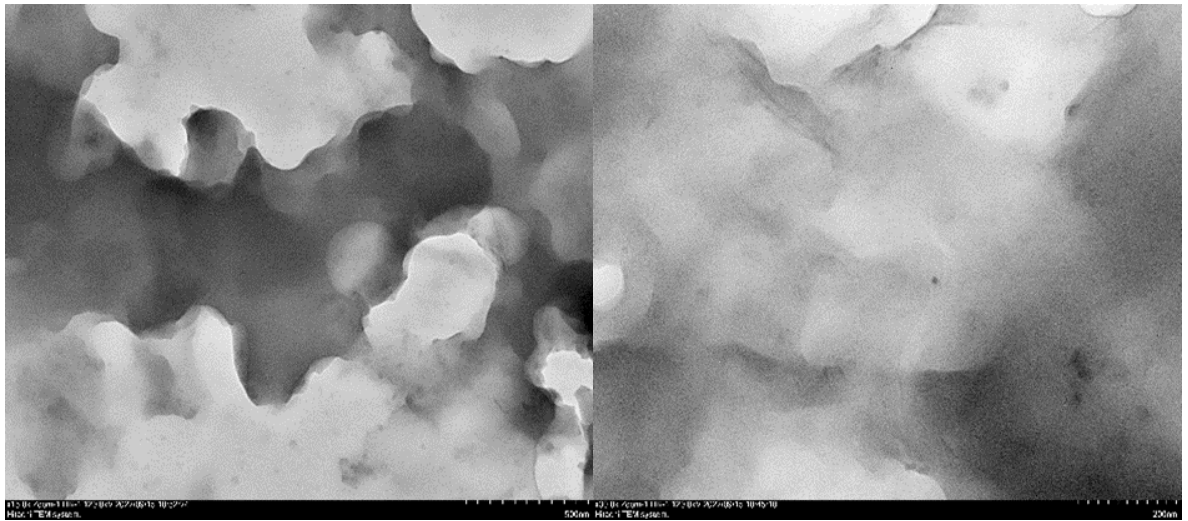
a1

a2



b1

b2



c1

c2

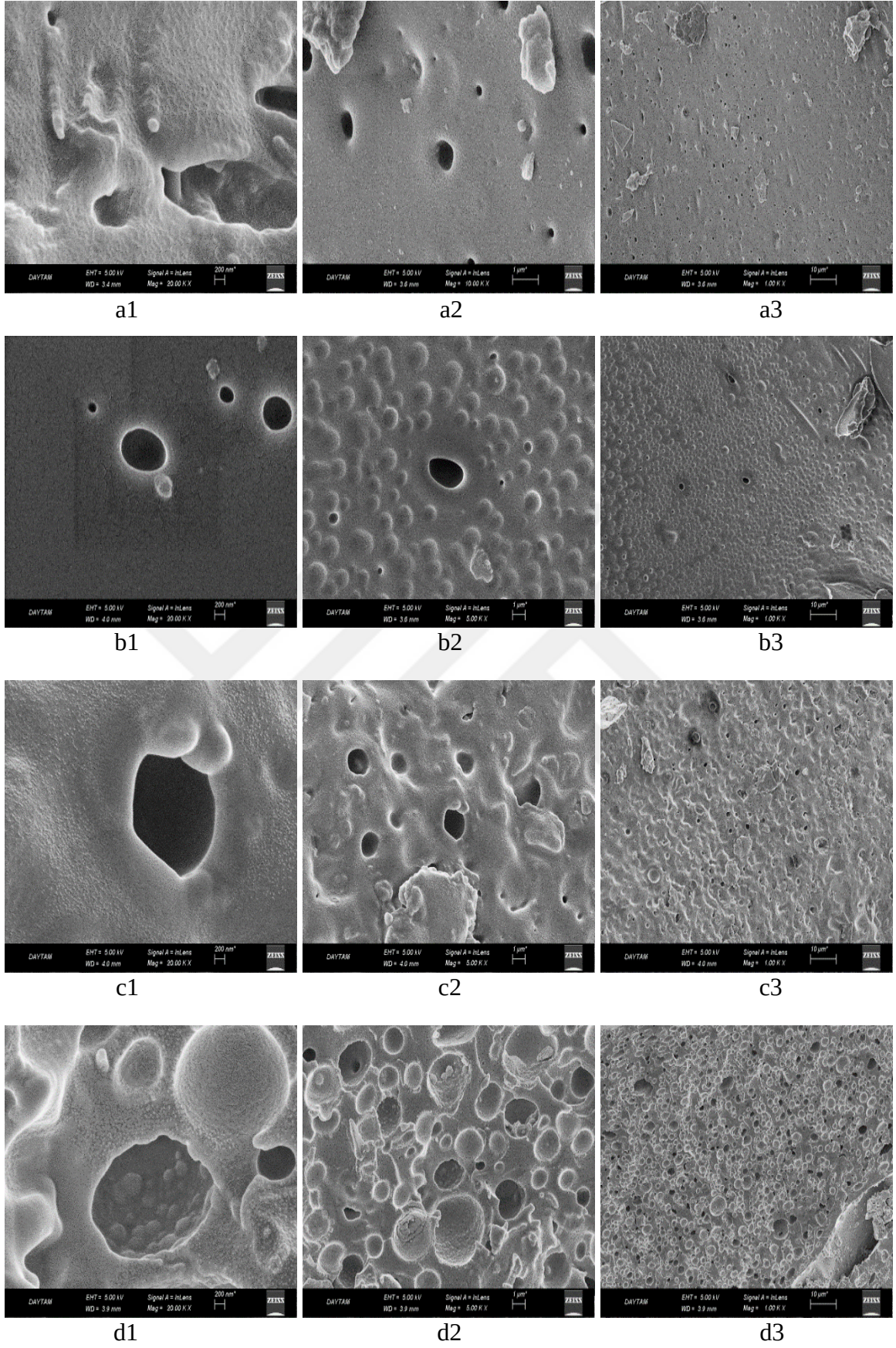
Şekil 29. Melamin Üre Formaldehit Organokil Nanokompozitleri MUFKNK1 (a1 (500nm) ve a2 (200nm)), MUFKNK2 (b1 (500nm) ve b2 (200nm)) ve MUFKNK3 (c1 (500nm) ve c2 (200nm))'nin farklı büyütmelerde HRTEM Görüntüleri

Şekil 28a ve b'deki HRTEM görüntülerinde görülen koyu uzun lifli çizgiler, 2:1 katmanlı yapıya sahip kil tabakalarını gösterir ve organokilin tabakalarında, ham montmorillonite kıyasla önemli ölçüde aralıklar görülmektedir.

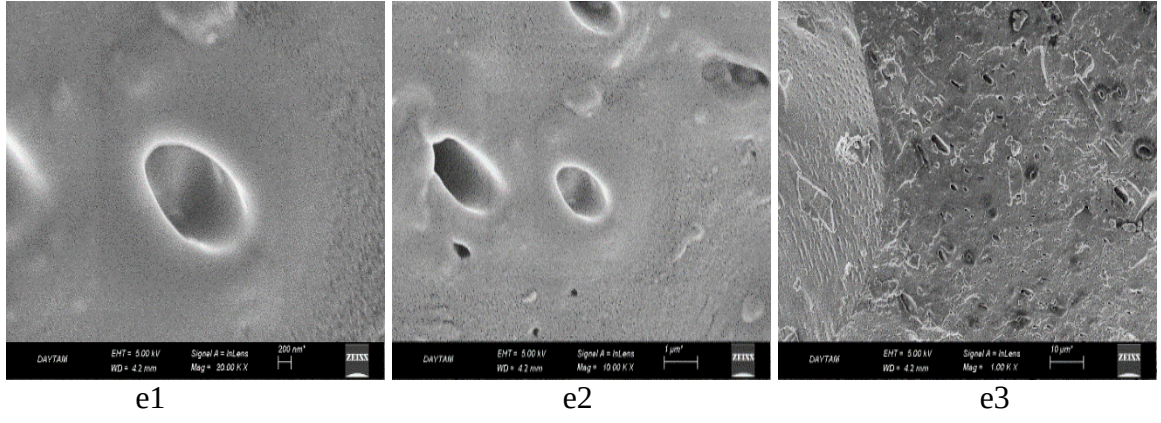
Şekil 28c'den, saf melamin formaldehit reçinesinin toplanmış mikroküreler halinde olduğu ve agregatların üç boyutlu olarak geliştiği görülebilir (Han *et al.* 2019). Bu dokusal düzenleme, sertleştirmeden önce mikrodalga ısınlama destekli köpüklendirme tekniğinin kullanılmasının bir sonucudur. Şekil 28d, saf MUF'un, saf MF'den daha yüksek etkileşim verimliliğini yansıtan, daha iyi birleştirilmiş nispeten küresel şekilli agregalardan oluşan bir dokusal yapı sergilediğini gösterir. Şekil 29 a, b ve c'den farklı oranlarda organo kili içeren kompozitlerin HRTEM görüntülerinde saf MUF'a kıyasla artan organokil oranıyla daha belirgin dokusal değişikliklerin meydana geldiği görülebilir. Şekil 30a'da organokil levhacıklarının kısmi topaklanma sergilemesine rağmen ağırlıklı olarak pul pul döküldüğü, ancak kompozitin dokusal yapısının saf MUF'unkine benzer olduğu görülmektedir. Şekil 30b ve Şekil 29c'den, daha yüksek organokil oranlarına sahip kompozitlerde organokil plakalarının neredeyse tamamen pul pul döküldüğü ve bunun çok daha düzgün bir düzenlemeyle sonuçlandığı görülebilir. Bu, küresel şekilli agregaların ya deforme olduğunu ya da daha küçük boyutlarda yapılandırıldığını gösteren dokusal bir yapılanma olarak yorumlanabilir (Ding *et al.* 2022; Naresh *et al.* 2022; Gürses and Şahin 2024).

Melamin formaldehit köpüğü (MF), melamin üre formaldehit köpüğü (MUF) melamin formaldehit organokil nanokompozitlerinin (MUFKNK1-3) yüzey morfolojik karakterizasyonu

Saf melamin formaldehit Köpük (MF), saf melamin üre formaldehit köpük (MUF) ve MUF-organokil nanokompozitleri (MUFKNK1-3) için alınan SEM desenleri Şekil 30'da verilmiştir. Saf melamin formaldehit köpüğünün Şekil 25a'daki deseni açıkça yüzey morfolojisinin, mikroküre kümelerinin her yönde sıkı ve birbirine bağlı yapılar olarak büyüdüğünü göstermektedir (Gao *et al.* 2020). Şekil 30 b3'den, yüksek düzeyde tekdüze mikrokürelerin MUF molekülleri ile etkili bir şekilde toplanmasıyla oluşan bir ağ yapısını gösteren bir morfolojinin ortaya çıktığı görülebilir.



Şekil 30. Melamin Formaldehit Köpük (MF, a1 (200nm), a2 (1 μm) ve a3 (10 μm)), Melamin Üre Formaldehit Köpük, (MUF, b1 (200nm), b2 (1 μm) ve b3 (10 μm)) ve Melamin Üre Formaldehit Organokil Nanokompozitleri, (MUFKNK1, c1 (200nm), c2 (1 μm) ve c3 (10 μm)), (MUFKNK2, d1 (200nm), d2 (1 μm) ve d3 (10 μm)) ve (MUFKNK3, e1 (200nm), e2 (1 μm) ve e3 (10 μm)) Farklı Büyütmelerde SEM Desenleri

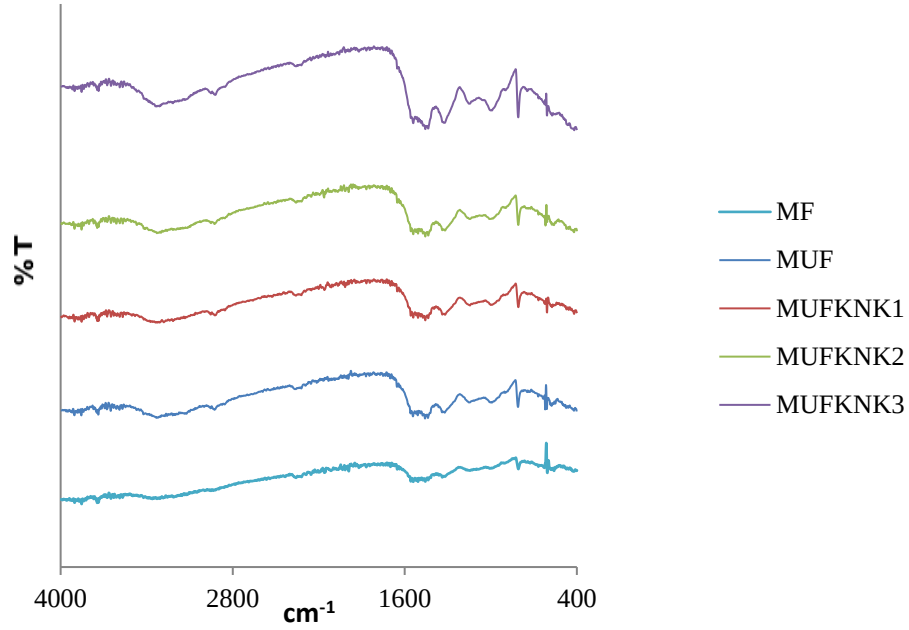


Şekil 30. Melamin Formaldehit Köpük (MF, a1 (200nm), a2 (1µm) ve a3 (10µm)), Melamin Üre Formaldehit Köpük, (MUF, b1 (200nm), b2 (1µm) ve b3 (10µm)) ve Melamin Üre Formaldehit Organokil Nanokompozitleri, (MUFKNK1, c1 (200nm), c2 (1µm) ve c3 (10µm)), (MUFKNK2, d1 (200nm), d2 (1µm) ve d3 (10µm)) ve (MUFKNK3, e1 (200nm), e2 (1µm) ve e3 (10µm)) Farklı Büyütmelerde SEM Desenleri (devamı)

Az miktarda organo kil içeren MUF nanokompozitinin morfolojik yapısı, saf MUF köpüğüne kıyasla önemli farklılıklar göstermiş; bu, daha büyük kümelerin rastgele lokalize olduğu bir ağ yapısında düzgün olmayan mikrokürelerin toplanmasını ima eden bir yüzey morfolojisini ortaya çıkarmıştır (Şekil 30c). Şekil 30d ve Şekil 30e’de yüksek organo kil oranlarıyla hazırlanan MUF nanokompozit köpüklerin yüzey morfolojileri, mikrokürelerin yoğun ve oldukça etkili uyumluluk kümeleriyle bütünsel bir yapı oluşturduğunu göstermektedir. Özellikle, Şekil 30e’den en yüksek organo kili içeren nanokompozit köpüğün mikrokürelerinin daha yüksek yüzey alanlı ve daha küçük boyutlarda oluşturulduğu, bunun sonucunda daha yakın bir agregasyon ve dolayısıyla daha üniform ve bütünsel bir yapı elde edildiği görülmektedir (Nemanič *et al.* 2014; Jia *et al.* 2018).

Melamin formaldehit köpük (MF), melamin üre formaldehit köpük (MUF) ve melamin üre formaldehit organokil nanokompozitlerinin (MUFKNK) FT-IR analizi

Farklı organokil oranlarında hazırlanan saf melamin formaldehit (MF), melamin üre formaldehit (MUF) ve melamin üre formaldehit-organokil nanokompozitlerinin (MUFKNK1, MUFKNK2 ve MUFKNK3) FT-IR spektrumları Şekil 32’de verilmiştir.



Şekil 31. Melamin Formaldehit Köpüğü (MF), Melamin Üre Formaldehit Köpüğü, (MUF), Melamin Formaldehit Organokil Nanokompozitleri, MUFKNK1, MUFKNK2 ve ve MUFKNK3'ün FT-IR spektrumları

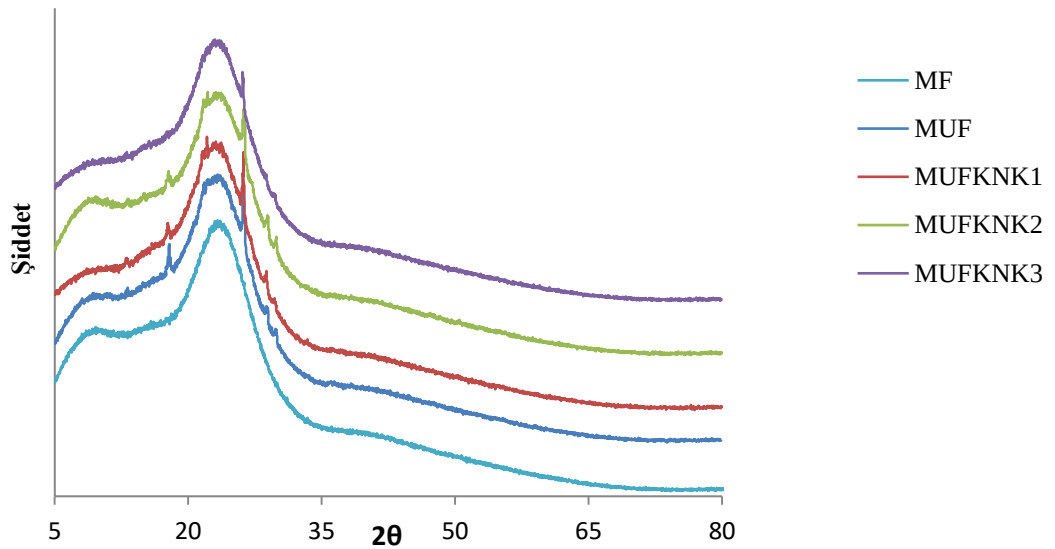
Şekil 31'de -C=O 'nun 1659 cm^{-1} 'deki titreşim zirvesi, triazin halkasının 1542 cm^{-1} 'deki deformasyon titreşim zirvesi, 1340 cm^{-1} 'deki -CH_2 bükülme titreşiminin zirvesi, simetrik esneme titreşimi zirvesi 1132 cm^{-1} 'de C-O-C , 1080 cm^{-1} 'de $\text{-CH}_2\text{OH}$ 'nin absorpsiyon zirvesi, 995 cm^{-1} 'de triazin halkası yan zincirinin C-H zirvesi ve düzlem dışı titreşim zirvesi 814 cm^{-1} 'de melamin halkası ortaya çıktı. 1542 ve 814 cm^{-1} 'deki karakteristik pikler melaminin triazin halkasının önemli göstergeleridir. MUF ve MUFKNK nanokompozitlerinin FT-IR spektrumları temel olarak benzerdir; bu da organo kil ilavesinin reçinelerin ana fonksiyonel grupları üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığını gösterir. MF reçine spektrumunda, 3437 cm^{-1} 'deki tepe noktaları N-H ve O-H bağlarının gerilme titreşimine atanabilirken, 1082 cm^{-1} 'deki tepe noktaları C-O-C gerilme titreşimine atanabilir. 2960 ve 1456 cm^{-1} 'deki tepe noktaları sırasıyla C-H'nin gerilme titreşimine ve bükülme titreşimine atanabilir. 1554 ve 1456 cm^{-1} 'deki zirvelerin her ikisi de heterosiklik nitrojendeki C=N 'nin gerilme titreşimine atfedilir. 814 cm^{-1} 'deki zirve tiyotriazinon'un karakteristik zirvesidir (Ma *et al.* 2013; Jia *et al.* 2018; Gao *et al.* 2020).

Melamin üre formaldehit organokil nanokompozitlerinin (MUFKNK1-3) spektrumlarında, 1026 ve 1036 cm^{-1} 'deki iki yoğun tepe Si-O gerilme titreşimlerini gösterirken, 3649 ve 3489 cm^{-1} 'deki tepeler serbest ve hidroksil gerilme titreşimlerinin katmanlar arası su moleküllerinden ortaya çıktığını gösterir. 1643 cm^{-1} 'deki zirve, kile adsorbe edilen su moleküllerinin (H-O-H) bükülme titreşimlerine atfedilebilir. Ayrıca 916 ve 768 cm^{-1} 'deki diğer zayıf tepe noktaları da kil katmanlarının kenarlarındaki Al-Al-OH bükülme titreşimlerine

atfedilebilir (Zhao *et al.* 1999). 532 ve 444 cm^{-1} 'deki zirveler aynı zamanda Si–O–Al (oktahedral Al) ve Si–O–Si bükülme titreşimleriyle de ilişkilendirildi. 2800-2950 cm^{-1} bölgesinde, organokil yüzeyine adsorbe edilen CTA^+ iyonlarından kaynaklanan CH_2 gruplarının antisimetrik ve simetrik gerilmesine karşılık gelen pikler sırasıyla 2920 ve 2868 cm^{-1} 'de ortaya çıkmıştır (Usuki *et al.* 1993). CTAB'ın C-N gerilme titreşiminin karakteristik zirvesi de 1471 cm^{-1} 'de gözlenmiştir (Adesakin *et al.* 2013).

Melamin formaldehit köpük (MF), melamin üre formaldehit köpük (MUF) ve melamin üre formaldehit organokil nanokompozitlerinin (MUFKNK) mineralojik yapılarının karakterizasyonu

Şekil 32'deki XRD difraktogramları, MF köpüğün XRD deseninde $9,4^\circ$ ve $23,8^\circ$ 'de iki tipik geniş tepenin görüldüğünü gösterir; bu da amorf bir yapıya işaret eder. Bu, melamin formaldehit köpüğünün metilol monomer parçalarının oluşumunun ve polimerik omurganın büyümesinin meydana geldiği anlamına gelir.



Şekil 32. Melamin Formaldehit Köpüğü (MF), Melamin Üre Formaldehit Köpüğü, (MUF), Melamin Formaldehit Organo Kil Nanokompozitleri, MUFKNK1, MUFKNK2 ve ve MUFKNK3'ün XRD Difraktogramları

Saf MUF köpüğü ve organo kil takviyeli MUF kompozitlerinde $17,9^\circ$, $21,0^\circ$, $26,5^\circ$, $28,0^\circ$ ve $29,3^\circ$ 'deki piklerin ortaya çıktığı görülebilir, bu da üre formaldehit kristal yapılarının polimer ağının bir parçası olarak görüldüğünü gösterir. Ayrıca en yüksek organo kil oranıyla hazırlanan kompozitte $17,6^\circ$ ve $21,0^\circ$ 'deki piklerin kaybolması organo kil levhacıklarının UF kökenli kristalin bölgeleri etkilediğini göstermektedir. Ayrıca Şekil 32'de, MUF köpüğünün iki zirvesinden küçük olanının, $8,1^\circ$ 'deki karakteristik smektit zirvesiyle kısmen örtüştüğü görülebilir (Gürses *et al.* 2015; Li *et al.* 2016; Han *et al.* 2020; Zhou *et al.* Zhou *et al.* 2012).

Bu sola kaymış veya önemli ölçüde deforme olmuş simektit zirvesi, polimer matrisinde pul pul dökülen organo kil tabakalarının ve nanokompozitin oluştuğunu işaret eder.

Melamin formaldehit köpük (MF), melamin üre formaldehit köpük (MUF) ve melamin üre formaldehit organokil nanokompozitlerinin (MUFKNK1-3) ısı yalıtım özellikleri

Isıl iletkenlik, bir malzemenin sabit koşullar altında ısıl performansını değerlendirmek için önemli bir özelliktir. Hazırlanan köpüklerin ısı yalıtım performansını değerlendirmek için farklı numuneler için ölçülen ısıl iletkenlik katsayıları dikkate alınmıştır (Amaral *et al.* 2017; Guo *et al.* 2022). Saf melamin formaldehit köpük (MF), saf melamin üre formaldehit köpük (MUF) ve MUF-organokil nanokompozitlerinin (MUFKNK1-3) termal iletkenlik katsayıları Tablo 9’da gösterilmektedir.

Tablo 9. Saf Melamin Formaldehit Köpük (MF), Saf Melamin Üre Formaldehit Köpük (MUF) ve MUF-Organokil Nanokompozit Köpüklerin (MUFKNK1-3) Termal İletkenliklerinin Analiz Sonuçları

Örnek Kodları	Isı İletim Katsayısı (λ) (W/m K)	Standart Sapma
MF (Melamin formaldehit köpük)	0,083	0,001
MUF (Melamin üre formaldehit köpük)	0,073	0,006
MUFKNK1 (MUF organokil nanokompozit köpük)	0,080	0,002
MUFKNK2 (MUF organokil nanokompozit köpük)	0,064	0,003
MUFKNK3 (MUF organokil nanokompozit köpük)	0,065	0,002

Bu tablodan da görülebileceği gibi en düşük ısıl iletkenlik katsayıları yüksek organo kil içeren MUF-organokil nanokompozitleri, MUFKNK2 ve MUFKNK3’te elde edilmiştir. Bu onların oldukça tekdüze ve bütünsel dokusal yapılarından beklenen bir sonuçtur. Özellikle organokil içeriği en yüksek olan nanokompozit köpükte (MUFKNK3) mikrokürelerin oluşturduğu dokusal ağ, nispeten daha kavisli labirent benzeri düzenlemeyle ısı iletimi açısından etkili bir bariyer oluşturabilmektedir. Öte yandan, en düşük organokil içeriğine (MUFKNK1) sahip MUF-organokil-nanokompozit köpük, saf MUF köpük ve saf MF köpük malzemeleri, yüksek organokil içeren nanokompozit köpüklere göre daha yüksek ısıl iletkenlik değerlerine sahiptir. Özellikle saf MF köpüğün saf MUF köpüğüne kıyasla daha düşük ısı

yalıtım davranışı, daha düzgün bir şekilde toplanmış mikrokürelerden oluşan MUF köpüğünün ağ yapısı ve polimerik ağda üre kökenli kristalin bölgelerin varlığı ile açıklanabilir. En düşük organokil içeriğine (MUFKNK1) sahip nanokompozit köpüğün, pul pul dökülmüş organo kil levhacıklarının lokalize olması ve dolayısıyla düzgün bir polimerik ağ oluşturamaması nedeniyle nispeten daha zayıf bir yalıtım davranışı sergilediği iddia edilebilir (Liu *et al.* 2016; Jia *et al.* 2018; Luo *et al.* 2019). Talaş (0,09-0,15 W/mK), ağaç kabuğu (0,061-0,076 W/mK), taş yünü ve cam yünü (0,04 W/mK), ekstrüde polistiren köpük (XPS) (0,028-0,031 W/mK), genleştirilmiş polistiren köpük (EPS) (0,04 W/mK), poliüretan köpük (0,035W/mK), cam köpüğü (0,052 W/mK) ve fenol köpük (0,04 W/mK) ile karşılaştırıldığında, özellikle organokil kil içeriği yüksek olan MUF nano kompozit köpüğün ısı iletim katsayısının çok yüksek olmadığı (0,064 W/mK) ve yalıtım malzemesi olarak uygun bir alternatif olduğu söylenebilir (Özlüsoylu and İstek 2019).

Melamin formaldehit köpük (MF), melamin üre formaldehit köpük (MUF) ve melamin üre formaldehit organokil nanokompozitlerinin (MUFKNK1-3) basınç dayanımları

Basınç dayanımı, bir malzemenin doğrudan basınç yükleri altına yerleştirilmesiyle ölçülen önemli bir mekanik özelliktir. Basınç dayanımı da kritik bir tasarım özelliğidir ve kompozit malzemeler, kompozit yapıya bağlı olarak bazı benzersiz basınç dayanımı davranışları sergileyebilir. Bazı malzemeler basınç dayanımının sınırında kırılır ve bazıları geri dönülemez şekilde deforme olur, dolayısıyla belirli bir miktardaki deformasyon basınç yükünün sınırı olarak kabul edilebilir. Kırılgan ve sünek malzemelerin basınç kırılma davranışı önemli ölçüde farklıdır. Gevrek malzemeler bölünmeye veya çapraz olarak kaymaya ve aniden kırılmaya eğilimliken, sünek malzemeler kılmadan akacak ve önemli ölçüde şekil değiştirecektir. Bu nedenle çoğu termoset polimer matrisli kompozit malzeme kırılgan kategorisindedir. Gözeneklilik birçok malzemede basınç dayanımını kontrol eden faktördür. Ana gözeneklerle yaklaşık aynı boyuta ulaşana kadar gözeneklerin çevresinde mikro çatlaklar oluşabilir. Gözenek veya sert tanecikler olmasa bile malzeme, uygulanan gerilime bağlı olarak zayıf eğimli arayüzeyler arasında mikro çatlaklar geliştirebilir. Bu arayüzeyler kayabilir ve ikincil bir çatlak oluşturabilir (Liu *et al.* 2020; Razalı *et al.* 2022).

Tablo 10, saf MF köpüğün, saf MUF köpüğün ve MUF organokil nano kompozitlerinin (MUFKNK1-3) yığın yoğunluğunu ve basınç dayanımı değerlerini göstermektedir.

Tablo 10. Saf Melamin Formaldehit Köpük (MF), Saf Melamin Üre Formaldehit Köpük (MUF) ve MUF-Organokil Nanokompozit Köpükler (MUFKNK1-3) İçin Kütle Yoğunluğu Değerleri ve Mekanik Test Sonuçları

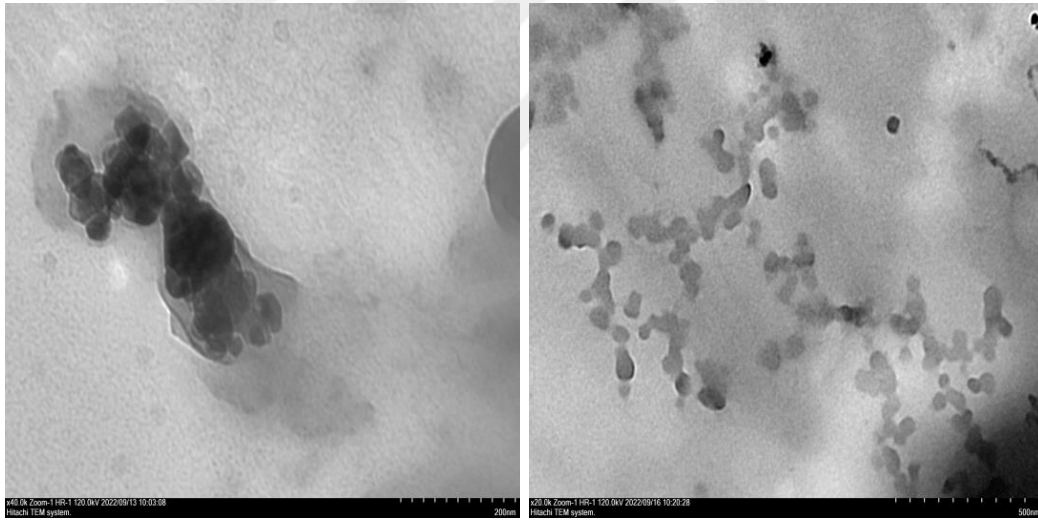
Örnek Kodları	Yoğunluk (g/cm ³)	Basınç Dayanımı (MPa)	Standart Sapma
MF (Melamin formaldehit köpük)	0,26	0,27	0,02
MUF (Melamin üre formaldehit köpük)	0,21	0,44	0,04
MUFKNK1 (MUF organokil nanokompozit köpük)	0,22	0,21	0,02
MUFKNK2 (MUF organokil nanokompozit köpük)	0,17	0,32	0,01
MUFKNK3 (MUF organokil nanokompozit köpük)	0,20	0,38	0,01

Saf MF köpüğün, saf MUF köpüğün ve MUF nanokompozit köpüklerin bulk yoğunluk sırası (MUFKNK 2) < (MUFKNK3) < (MUF) < (MUFKNK1) < (MF) şeklindedir. Bulk yoğunluğu en yüksek olan MF köpük daha sünek bir yapıya sahiptir ve buna bağlı olarak basınç dayanımı değeri de diğer köpüklere göre nispeten yüksektir. MF köpüğüne göre nispeten daha düşük bulk yoğunluğuna sahip olan MUF köpüğünün daha düşük bir basınç dayanımı sergilemesi, MF köpüğüne göre daha kırılğan bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Öte yandan, en düşük organokil içeriğine sahip MUF nanokompozit köpük, nispeten düşük yoğunluk ve en düşük basınç dayanımı göstermiştir; bu, muhtemelen polimerik matris içindeki organokil levhacıklarının lokalize dağılımından dolayı daha kırılğan bir yapıya işaret etmektedir. Kıl içeriğinin artmasıyla, MUF nanokompozit köpükleri çok daha düşük bulk yoğunlukları ve önemli ölçüde daha yüksek basınç mukavemetleri sergiledi; bu, polimerik matriste organokil levhacıklarının pul pul döküldüğünü ve gelişmiş sünekliği gösterir. Saf MF köpüğün ve saf MUF köpüğün basınç dayanımları sırasıyla 0,27 N/mm² ve 0,44 N/mm²'dir. Bu tablodan, üre kökenli parçaların polimerik matrise dahil edilmesinin, basınç dayanımı veya sıkıştırma kapasitesi açısından yaklaşık iki kat iyileşme sağladığı görülmektedir. MUF organokil nanokompozit köpüklerinde, düşük organokil oranındaki (MUFKNK1) basınç dayanımı değeri 0,21 N/mm² olup, saf MUF köpüğünden daha düşüktür (Razalı *et al.* 2022). Kırılğan ve yarı kırılğan malzemelerde basınç altında zayıflığın ana nedeni mikro çatlaklardır. Çatlak uçları boyunca kayma, çatlağın ucu boyunca çekme kuvvetlerine neden olur. Çeşitli faktörlere bağlı olarak gelişebilen mikro çatlaklar, önceden var olan çatlak uçları çevresinde oluşma eğilimindedir. Her durumda, yerel gerilim alanlarını yaratan, yerel mikroyapısal

anormalliklerle etkileşime giren genel küresel basınç gerilimidir. Benzer şekilde, düşük organokil içeriği ile hazırlanan nanokompozitin (MUFKNK1) düşük basınç dayanımı, organokil levhacıklarının polimerik matristeki lokalizasyonuna veya bunların düzgün olmayan dağılımına bağlanabilir (Jumahat *et al.* 2012). Malzemenin içindeki katı parçacıklar lokal gerilme bölgelerine neden olabilir ancak bu etki aynı zamanda ilaveler arttığında mukavemetin de artmasına neden olabilir. Diğer taraftan, daha fazla organokil ilavesiyle polimerik matriks içerisinde dağılmış organokil levhacıklarının oranının artması nedeniyle basınç dayanımı değerleri artmaya başlamıştır. Nanokompozitler arasında en yüksek basınç dayanımı değeri, ağırlıkça %0,45 organokil içeren nanokompozit köpük (MUFKNK3) için $0,38\text{N/mm}^2$ olarak ölçülmüştür.

Melamin Formaldehit Köpük (MF), Melamin Anilin Formaldehit Köpük (MAF) ve Melamin Anilin Formaldehit Organokil Nanokompozitlerine (MAFKNK) Ait Bulgular

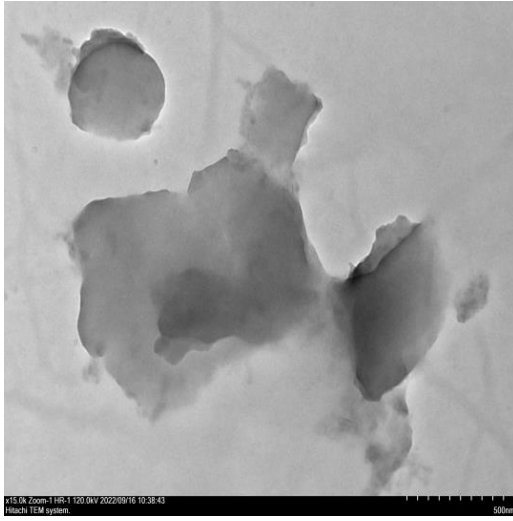
Melamin formaldehit köpük (MF), melamin anilin formaldehit köpük (MAF) ve melamin anilin formaldehit organokil nanokompozitlerinin (MAFKNK) dokusal karakterizasyonu



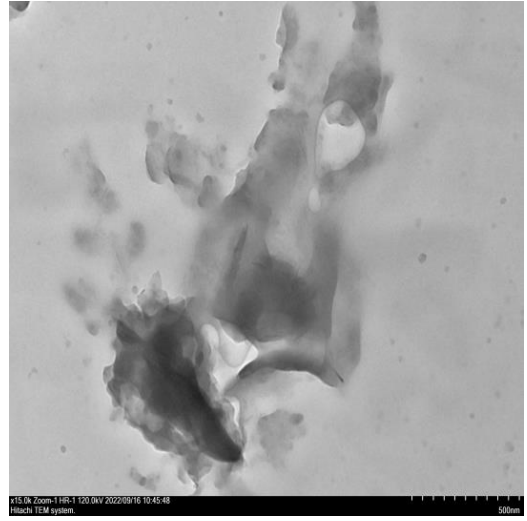
(a)

(b)

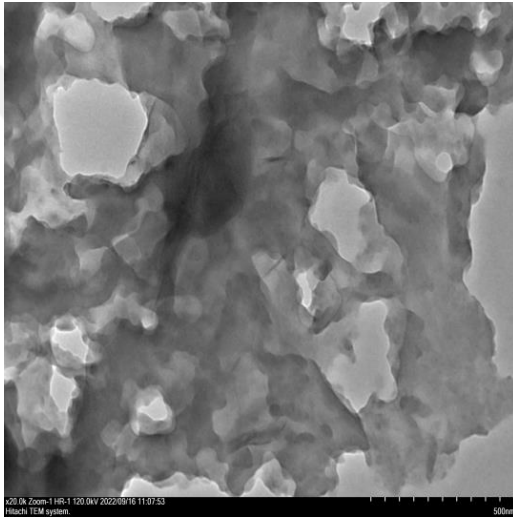
Şekil 33. Melamin formaldehit köpük (MF) (a) ve melamin anilin formaldehit köpük (MAF) (b), melamin anilin formaldehit organokil nanokompozitlerinin MAFKNK1-6 (c-h) HRTEM görüntüleri



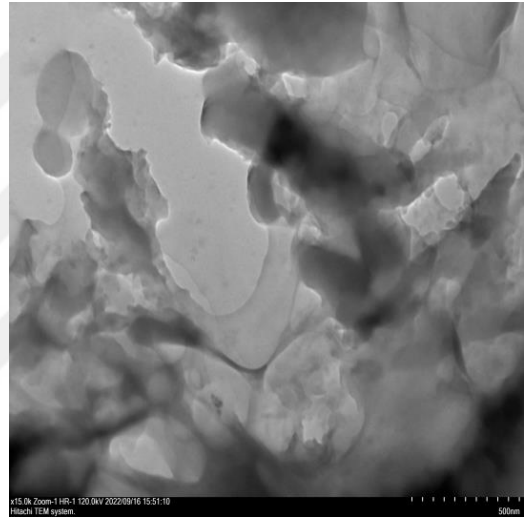
(c)



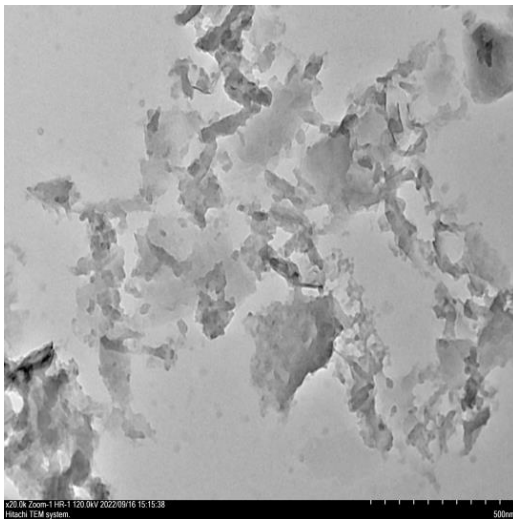
(d)



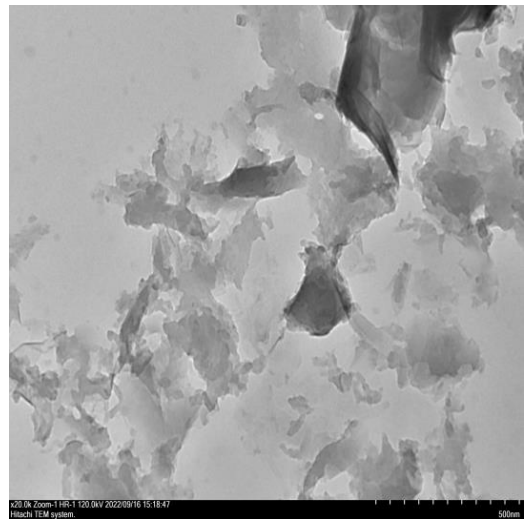
(e)



(f)



(g)



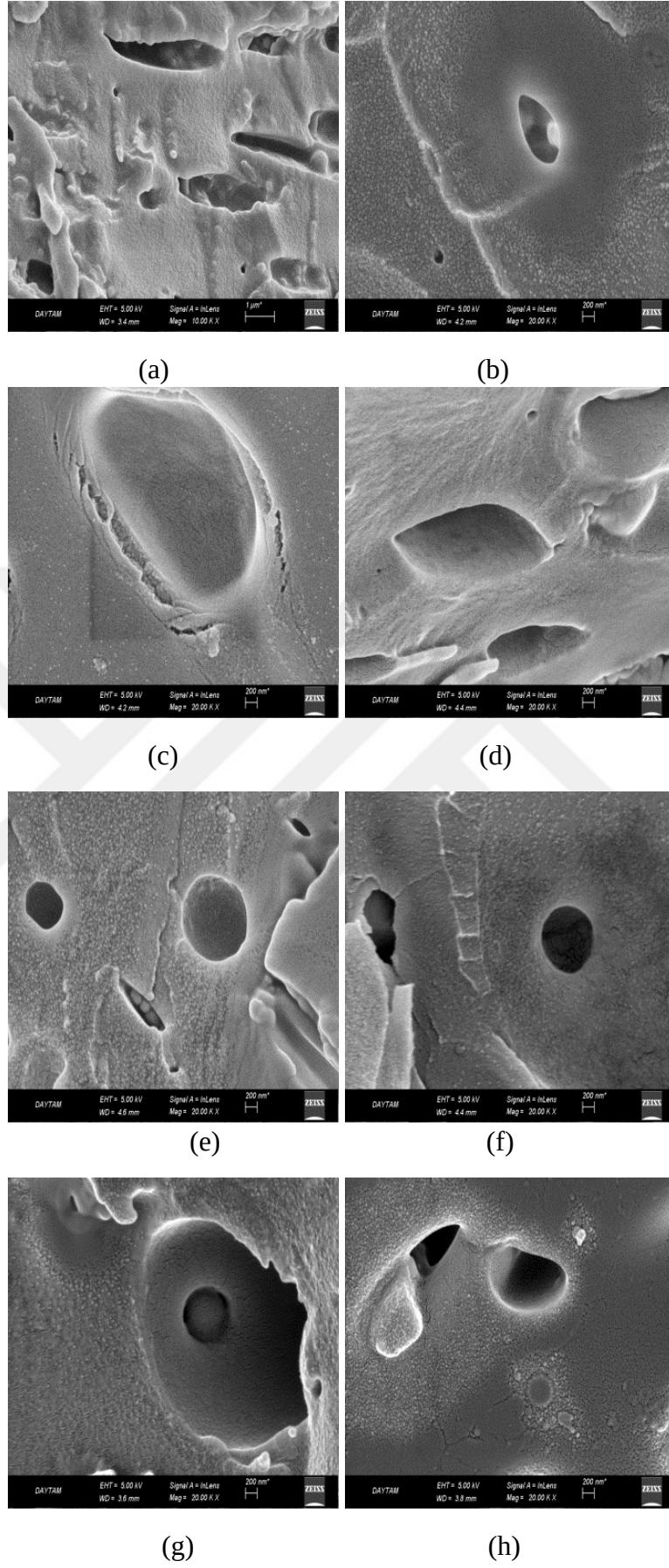
(h)

Şekil 33. Melamin formaldehit köpük (MF) (a) ve melamin anilin formaldehit köpük (MAF) (b), melamin anilin formaldehit organokil nanokompozitlerinin MAFKNK1-6 (c-h) HRTEM görüntüleri (Devamı)

Şekil 33a'dan, saf melamin formaldehit reçinesinin toplanmış mikroküreler halinde oluştuğu ve agregatların üç boyutlu olarak geliştiği görülebilir (Han *et al.* 2019). Bu dokusal düzenleme, sertleştirmeden önce mikrodalga ısınlama destekli köpüklendirme tekniğinin kullanılmasının bir sonucudur. Şekil 33b, saf MAF'ın, saf MF'den daha homojen olarak nispeten küresel şekilli ayrılmış agregalardan oluşan bir dokusal yapı sergilediğini gösterir. Şekil 33 c'den 33 h'ye kadar farklı oranlarda organokil içeren kompozitlerin HRTEM görüntülerinde saf MAF'a kıyasla artan organokil oranıyla daha belirgin dokusal değişikliklerin meydana geldiği görülebilir. Şekil 33c'de organo kil levhacıklarının varlığının daha kaynaşmış ancak plakalı bir yapılanmanın ortaya çıkmasına yol açtığı görülmektedir. Şekil 33g ve h, daha yüksek organokil oranlarına sahip kompozitlerde, organokil plakalarının pul pul dökülmekle birlikte, dağılımlarının homojen olmadığı bölgeleri de gösterir. Bu, üst üste plakaların daha küçük boyutlarda küresellikten uzaklaştığını gösteren dokusal bir yapı olarak yorumlanabilir (Rashid *et al.* 2020).

Melamin formaldehit köpüğü (MF), melamin anilin formaldehit köpüğü (MAF) melamin anilin formaldehit organokil nanokompozitlerinin (MAFKNK1-6) yüzey morfolojik karakterizasyonu

Saf melamin formaldehit Köpük (MF), saf melamin anilin formaldehit köpük (MAF) ve MAF-organokil nanokompozitleri (MAFKNK1-6) için alınan SEM desenleri Şekil 34'te verilmiştir. Saf melamin formaldehit köpüğünün Şekil 34 (a)'daki deseni yüzey morfolojisi, mikroküre kümelerinin her yönde sıkı ve birbirine bağlı yapılar olarak büyüdüğünü açıkça göstermektedir (Gao *et al.* 2020).

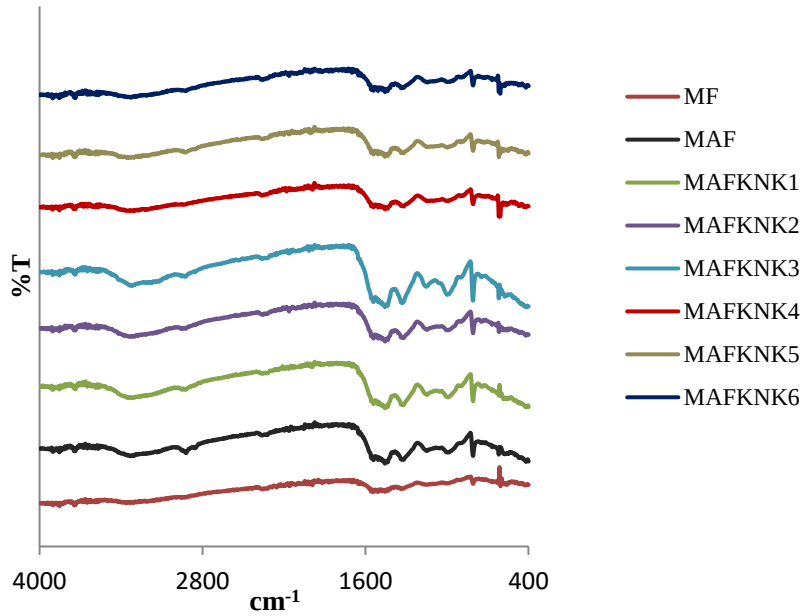


Şekil 34. Melamin Formaldehit Köpük (MF), Melamin Anilin Formaldehit Köpük (MAF) ve Melamin Anilin Formaldehit Organokil Nanokompozitlerinin (MAFKNK1-6) SEM Desenleri

Saf MAF köpüğün yüzey morfolojik yapısı, saf MF köpüğüne kıyasla önemli farklılıklar gösterdiği Şekil 34a ve b'den görülebilir. Saf MAF halinde, mikro kürelerin üç boyutlu olarak oldukça homojen dizilimini ima eden bir yüzey morfolojisini ortaya çıktığı söylenebilir (Şekil 34b). Yüksek organokil oranlarıyla hazırlanan MAF nanokompozit köpüklerin yüzey morfolojileri, mikrokürelerin yoğun ve oldukça etkili uyumluluk kümeleriyle bütünsel bir yapı oluşturduğu düzgün küresel çukurların da bu yapılanmanın varlığını işaret ettiği Şekil 34 e-h'tan görülebilir (Azarpour *et al.* 2022; Rashid *et al.* 2020; Nemanič *et al.* 2014; Jia *et al.* 2018).

Melamin formaldehit köpük (MF), melamin anilin formaldehit köpük (MAF) ve melamin anilin formaldehit organokil nanokompozitlerinin (MAFKNK) FT-IR analizi

Farklı organokil oranlarında hazırlanan saf melamin formaldehit (MF), melamin anilin formaldehit (MAF) ve melamin anilin formaldehit-organokil nanokompozitlerinin (MAFKNK1-6) FT-IR spektrumları Şekil 35'te verilmiştir.



Şekil 35. Melamin Formaldehit Köpüğü (MF), Melamin Anilin Formaldehit Köpüğü (MAF) ve Melamin Anilin Formaldehit Organokil Nanokompozitlerinin (MAFKNK1-6) FT-IR spektrumları

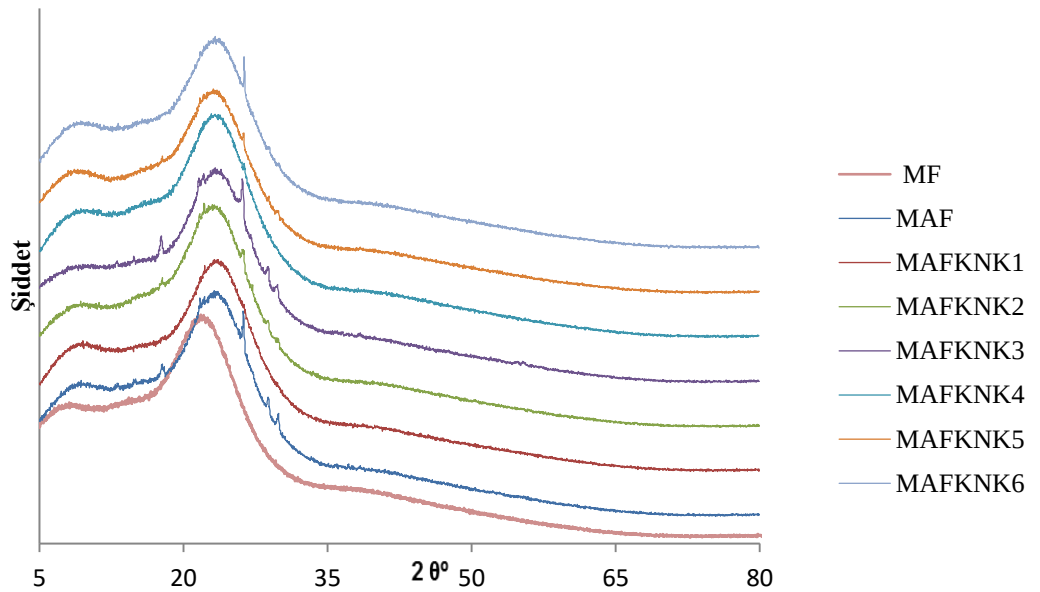
Şekil 35'te -C=O 'nun 1659 cm^{-1} 'deki titreşim piki, triazin halkasının 1542 cm^{-1} 'deki deformasyon titreşim piki, 1340 cm^{-1} 'deki -CH_2 bükülme titreşiminin piki, simetrik esneme titreşimi piki 1132 cm^{-1} 'de C-O-C , 1080 cm^{-1} 'de $\text{-CH}_2\text{OH}$ 'nin absorpsiyon piki, 995 cm^{-1} 'de triazin halkası yan zincirinin C-H piki ve düzlem dışı titreşim piki 814 cm^{-1} 'de melamin halkası ortaya çıktı. 1542 ve 814 cm^{-1} 'deki karakteristik pikler melaminin triazin halkasının önemli göstergeleridir. MAF ve MAFKNK nanokompozitlerinin FT-IR spektrumları temel olarak benzerdir; bu da organokil ilavesinin reçinelerin ana fonksiyonel grupları üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığını gösterir. MF reçine spektrumunda, 3437 cm^{-1} 'deki pikler N-H ve O-H

bağlarının gerilme titreşimine atanabilirken, 1082 cm^{-1} 'deki tepe noktaları C-O-C gerilme titreşimine atanabilir. 2960 ve 1456 cm^{-1} 'deki pikler sırasıyla, C-H'nin gerilme titreşimine ve bükülme titreşimine atfedilebilir. 1554 ve 1456 cm^{-1} 'deki zirvelerin her ikisi de heterosiklik nitrojendeki C=N'nin gerilme titreşimine atfedilir. 814 cm^{-1} 'deki zirve tiyotriazinon'un karakteristik pikidir (Ma *et al.* 2013; Jia *et al.* 2018; Gao *et al.* 2020).

Melamin anilin formaldehit organokil nanokompozitlerinin (MAFKNK1-6) spektrumlarında, 1026 ve 1036 cm^{-1} 'deki iki yoğun pik Si-O gerilme titreşimlerini gösterir (Zhao *et al.* 1999; Gürses *et al.* 2016). 532 ve 444 cm^{-1} 'deki pikler aynı zamanda Si-O-Al (oktahedral Al) ve Si-O-Si bükülme titreşimleriyle de ilişkilendirildi. 2800-2950 cm^{-1} bölgesinde, organokil yüzeyine adsorbe edilen CTA⁺ iyonlarından kaynaklanan CH₂ gruplarının antisimetrik ve simetrik gerilmesine karşılık gelen pikler sırasıyla 2920 ve 2868 cm^{-1} 'de ortaya çıkmıştır (Usuki *et al.* 1993). CTAB'ın C-N gerilme titreşiminin karakteristik zirvesi de 1471 cm^{-1} 'de gözlenmiştir (Adesakin *et al.* 2013).

Melamin formaldehit köpük (MF), melamin anilin formaldehit köpük (MAF) ve melamin anilin formaldehit organokil nanokompozitlerinin (MAFKNK) mineralojik yapılarının karakterizasyonu

Şekil 36'daki XRD difraktogramları, MF köpüğün XRD deseninde 9,4° ve 23,8°'de iki tipik geniş tepenin görüldüğünü gösterir; bu da amorf bir yapıya işaret eder. Bu, melamin formaldehit köpüğünün metilol monomer parçalarının oluşumunun ve polimerik omurganın büyümesinin meydana geldiği anlamına gelir.



Şekil 36. Melamin Formaldehit Köpüğü (MF), Melamin Anilin Formaldehit Köpüğü (MAF), Melamin Anilin Formaldehit Organokil Nanokompozitlerinin (MAFKNK1-6) XRD Difraktogramları

Saf MAF köpüğü ve organo kil takviyeli MAF kompozitlerinde polimer ağında 17,7°, 20,9°, 21,3°, 26,3° ve 28,9°'deki piklerin ortaya çıktığı görülebilir, bu da anilin formaldehit kristal yapılarının bir parçası olarak görüldüğünü gösterir. Ayrıca en yüksek organo kil oranıyla hazırlanan kompozitte 17,7° ve 20,9°'daki piklerin kaybolması organo kil levhacıklarının AF (anilin formaldehit) kökenli kristalin bölgeleri etkilediğini göstermektedir. Ayrıca Şekil 37'de, MAF köpüğünün iki zirvesinden küçük olanının, 7,8°'deki karakteristik smektit zirvesiyle kısmen örtüştüğü görülebilir (Gürses *et al.* 2015; Li *et al.* 2016; Han *et al.* 2020; Zhou *et al.* 2012). Bu sola kaymış veya önemli ölçüde deforme olmuş smektit zirvesi, polimer matrisinde pul pul dökülen organo kil tabakalarının ve nanokompozitin oluştuğunu açıkça gösterir.

Melamin formaldehit köpük (MF), melamin anilin formaldehit köpük (MAF) ve melamin anilin formaldehit organokil nanokompozitlerinin (MAFKNK1-6) ısı yalıtım özellikleri

Isıl iletkenlik, bir malzemenin sabit koşullar altında ısı performansını değerlendirmek için önemli bir özelliktir. Hazırlanan köpüklerin ısı yalıtım performansını değerlendirmek için farklı numuneler için ölçülen ısıl iletkenlik katsayıları dikkate alınmıştır (Amaral *et al.* 2017; Ivanova *et al.* 2018; Guo *et al.* 2022). Saf melamin formaldehit köpük (MF), saf melamin anilin formaldehit köpük (MAF) ve MAF-organokil nanokompozitlerinin (MAFKNK1-6) termal iletkenlik katsayıları Tablo 11'de gösterilmektedir.

Tablo 11. Saf Melamin Formaldehit Köpük (MF), Saf Melamin Anilin Formaldehit Köpük (MAF) ve MAF-Organokil Nanokompozit Köpüklerin (MAFKNK1-6) Termal İletkenliklerinin Analiz Sonuçları

Örnek Kodları	Isı İletim Katsayısı (λ) (W/m K)	Standart Sapma
MF (Melamin formaldehit köpük)	0,083	0,001
MAF (Melamin anilin formaldehit köpük)	0,053	0,006
MAFKNK1 (MAF organokil nanokompozit köpük)	0,062	0,002
MAFKNK2 (MAF organokil nanokompozit köpük)	0,051	0,003
MAFKNK3 (MAF organokil nanokompozit köpük)	0,053	0,002
MAFKNK4 (MAF organokil nanokompozit köpük)	0,054	0,008
MAFKNK5 (MAF organokil nanokompozit köpük)	0,065	0,002
MAFKNK6 (MAF organokil nanokompozit köpük)	0,075	0,003

Bu tablodan da görülebileceği gibi en düşük ısı iletkenlik katsayıları düşük organokil içeren MAFKNK2, MAFKNK3, MAFKNK4 ve saf MAF örneğinde elde edilmiştir. Bu onların oldukça tekdüze ve bütünsel dokusal yapılarından beklenen bir sonuçtur. Özellikle organokil içeriği düşük olan nanokompozit köpükte (MAFKNK2) mikrokürelerin oluşturduğu dokusal ağ, nispeten daha kavisli labirent benzeri düzenlemeyle ısı iletimi açısından etkili bir bariyer oluşturabilmektedir. Öte yandan, saf MF köpük malzemeleri, yüksek organo kil içeren nanokompozit köpüklere göre daha yüksek ısı iletkenlik değerlerine sahiptir. Özellikle saf MF köpüğün saf MAF köpüğüne kıyasla yüksek ısı yalıtım davranışı, daha düzgün bir şekilde toplanmış mikrokürelerden oluşan MAF köpüğünün ağ yapısı ve polimerik ağda anilin kökenli kristalin bölgelerin varlığı ile açıklanabilir. En düşük organokil içeriğine (MAFKNK1) sahip nanokompozit köpüğün, pul pul dökülmüş organo kil levhacıklarının lokalize olması ve dolayısıyla düzgün bir polimerik ağ oluşturamaması nedeniyle nispeten daha zayıf bir yalıtım davranışı sergilediği iddia edilebilir (Liu *et al.* 2016; Jia *et al.* 2018; Luo *et al.* 2019). Özellikle organokil içeriği yüksek olan MAF nano kompozit köpüğün (MAFKNK6) ısı iletim

katsayısının çok yüksek olması (0,075 W/mK) yüksek kil oranının köpük yapısında kısmi rijitleşmeye yol açtığı şeklinde yorumlanabilir (Özlüsoylu and İstek 2019).

Melamin formaldehit köpük (MF), melamin anilin formaldehit köpük (MAF) ve melamin anilin formaldehit organokil nanokompozitlerinin (MAFKNK1-6) basınç dayanımları

Basınç dayanımı, bir malzemenin doğrudan basınç yükleri altına yerleştirilmesiyle ölçülen önemli bir mekanik özelliktir. Basınç dayanımı da kritik bir tasarım özelliğidir ve kompozit malzemeler, kompozit yapıya bağlı olarak bazı benzersiz basınç dayanımı davranışları sergileyebilir. Bazı malzemeler basınç dayanımının sınırında kırılır ve bazıları geri dönülemez şekilde deforme olur, dolayısıyla belirli bir miktardaki deformasyon basınç yükünün sınırı olarak kabul edilebilir. Kırılgan ve sünek malzemelerin basınç kırılma davranışı önemli ölçüde farklıdır. Gevrek malzemeler bölünmeye veya çapraz olarak kaymaya ve aniden kırılmaya eğilimliken, sünek malzemeler arızalanmadan akacak ve önemli ölçüde şekil değiştirecektir. Bu nedenle çoğu termoset polimer matrisli kompozit malzeme kırılgan kategorisindedir. Gözeneklilik birçok malzemedeki basınç dayanımını kontrol eden faktördür. Ana gözeneklerle yaklaşık aynı boyuta ulaşana kadar gözeneklerin çevresinde mikro çatlaklar oluşabilir. Gözenek veya sert tanecikler olmasa bile malzeme, uygulanan gerilime bağlı olarak zayıf eğimli arayüzler arasında mikro çatlaklar geliştirebilir. Bu arayüzler kayabilir ve ikincil bir çatlak oluşturabilir (Liu *et al.* 2020; Razalı *et al.* 2022).

Tablo 12, saf MF köpüğün, saf MAF köpüğün ve MAF organo kil nano kompozitlerinin (MAFKNK1-6) yığın yoğunluğunu ve basınç dayanımı değerlerini göstermektedir.

Tablo 12. Saf Melamin Formaldehit Köpük (MF), Saf Melamin Anilin Formaldehit Köpük (MAF) ve MAF-Organokil Nanokompozit Köpükler (MAFKNK1-6) İçin Kütle Yoğunluğu Değerleri ve Mekanik Test Sonuçları

Örnek Kodları	Yoğunluk (g/cm ³)	Basınç Dayanımı (MPa)	Standart Sapma
MF (Melamin formaldehit köpük)	0,26	0,27	0,018
MAF (Melamin anilin formaldehit köpük)	0,19	0,30	0,011
MAFKNK1 (MAF organokil nanokompozit köpük)	0,23	0,24	0,035
MAFKNK2 (MAF organokil nanokompozit köpük)	0,16	0,33	0,034
MAFKNK3 (MAF organokil nanokompozit köpük)	0,17	0,19	0,021
MAFKNK4 (MAF organokil nanokompozit köpük)	0,15	0,34	0,035
MAFKNK5 (MAF organokil nanokompozit köpük)	0,23	0,40	0,029
MAFKNK6 (MAF organokil nanokompozit köpük)	0,22	0,29	0,022

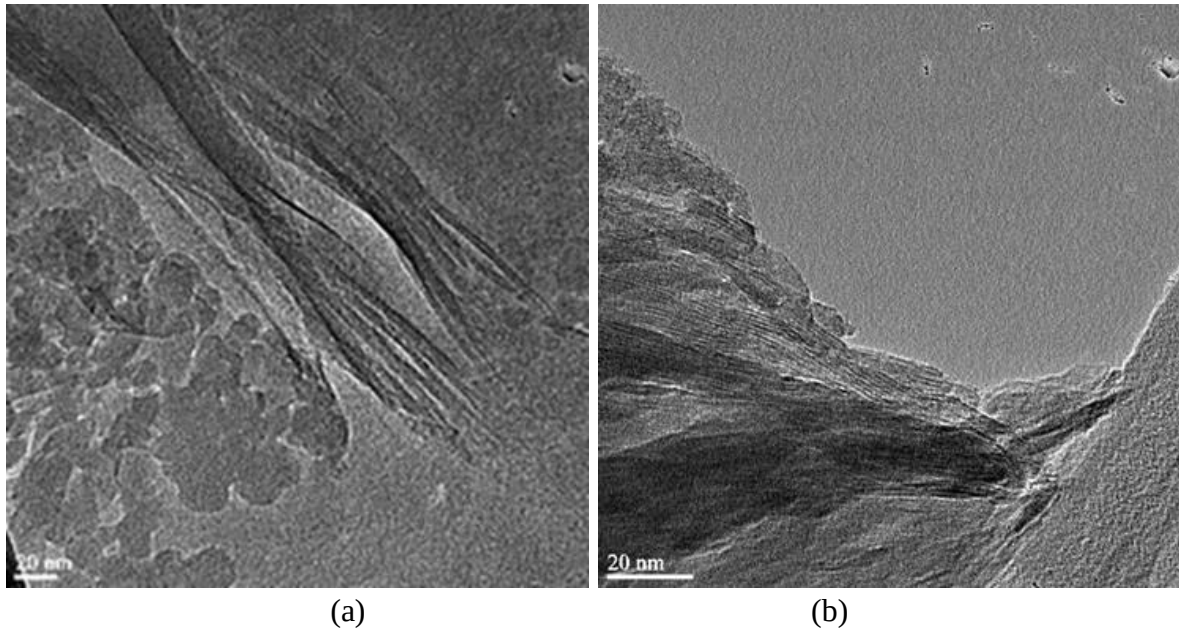
Saf MF köpüğün, saf MAF köpüğün ve MAF nanokompozit köpüklerin bulk yoğunluk sırası (MAFKNK 4) < (MAFKNK2) < (MAFKNK3) < (MAF) < (MAFKNK6) < (MAFKNK5) = (MAFKNK1) < (MF) şeklindedir. Bulk yoğunluğu en yüksek olan MF köpük daha gevrek bir yapıya sahiptir. MF köpüğüne göre nispeten daha düşük bulk yoğunluğuna sahip olan MAF köpüğünün daha yüksek bir basınç dayanımı sergilemesi, MF köpüğünün daha sünek bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Öte yandan, en düşük organokil içeriğine sahip MAF nanokompozit köpük, nispeten yüksek yoğunluk ve daha düşük basınç dayanımı gösterdi. Kil içeriğinin artmasıyla, MAF nanokompozit köpükleri önemli ölçüde daha yüksek basınç mukavemetleri sergilediği Tablo 12’den görülmektedir. Bu, polimerik matriste organokil levhacıklarının pul pul döküldüğünü ve artan sünekliği gösterir. Saf MF köpüğün ve saf MAF köpüğün basınç dayanımları sırasıyla 0,27 N/mm² ve 0,30N/mm²’dir. Bu tablodan anilin kökenli parçaların polimerik matrise dâhil edilmesinin, basınç dayanımı veya sıkıştırma kapasitesi açısından ciddi iyileşme sağladığı görülmektedir (MAFKNK5). MAF organo kil nanokompozit köpüklerinde, düşük organokil oranındaki (MAFKNK1) basınç dayanımı değeri 0,24 N/mm² olup, saf MAF köpüğünden daha düşüktür (Razalı *et al.* 2022). Kırılgan ve yarı kırılgan malzemelerde basınç altında zayıflığın ana nedeni mikro çatlaklardır. Çatlak uçları boyunca kayma, çatlağın ucu boyunca çekme kuvvetlerine neden olur. Çeşitli faktörlere bağlı olarak gelişebilen mikro çatlaklar, önceden var olan çatlak uçları çevresinde oluşma

eğilimindedir. Her durumda, yerel gerilim alanlarını yaratan, yerel mikroyapısal anormalliklerle etkileşime giren genel küresel basınç gerilimidir. Benzer şekilde, düşük organo kil içeriği ile hazırlanan nanokompozitin (MAFKNK1) düşük basınç dayanımı, organokil levhacıklarının polimerik matristeki lokalizasyonuna veya bunların düzgün olmayan dağılımına bağlanabilir (Jumahat *et al.* 2012). Malzemenin içindeki katı parçacıklar lokal gerilme bölgelerine neden olabilir ancak bu etki aynı zamanda ilaveler arttığında mukavemetin de artmasına neden olabilir. Diğer taraftan, daha fazla organokil ilavesiyle polimerik matriks içerisinde dağılmış organokil levhacıklarının oranının artması nedeniyle basınç dayanımı değerleri artmaya başlamıştır. Nanokompozitler arasında en yüksek basınç dayanımı değeri, ağırlıkça %0,40 organo kil içeren nanokompozit köpük (MAFKNK5) için 0,40N/mm² olarak ölçüldü.

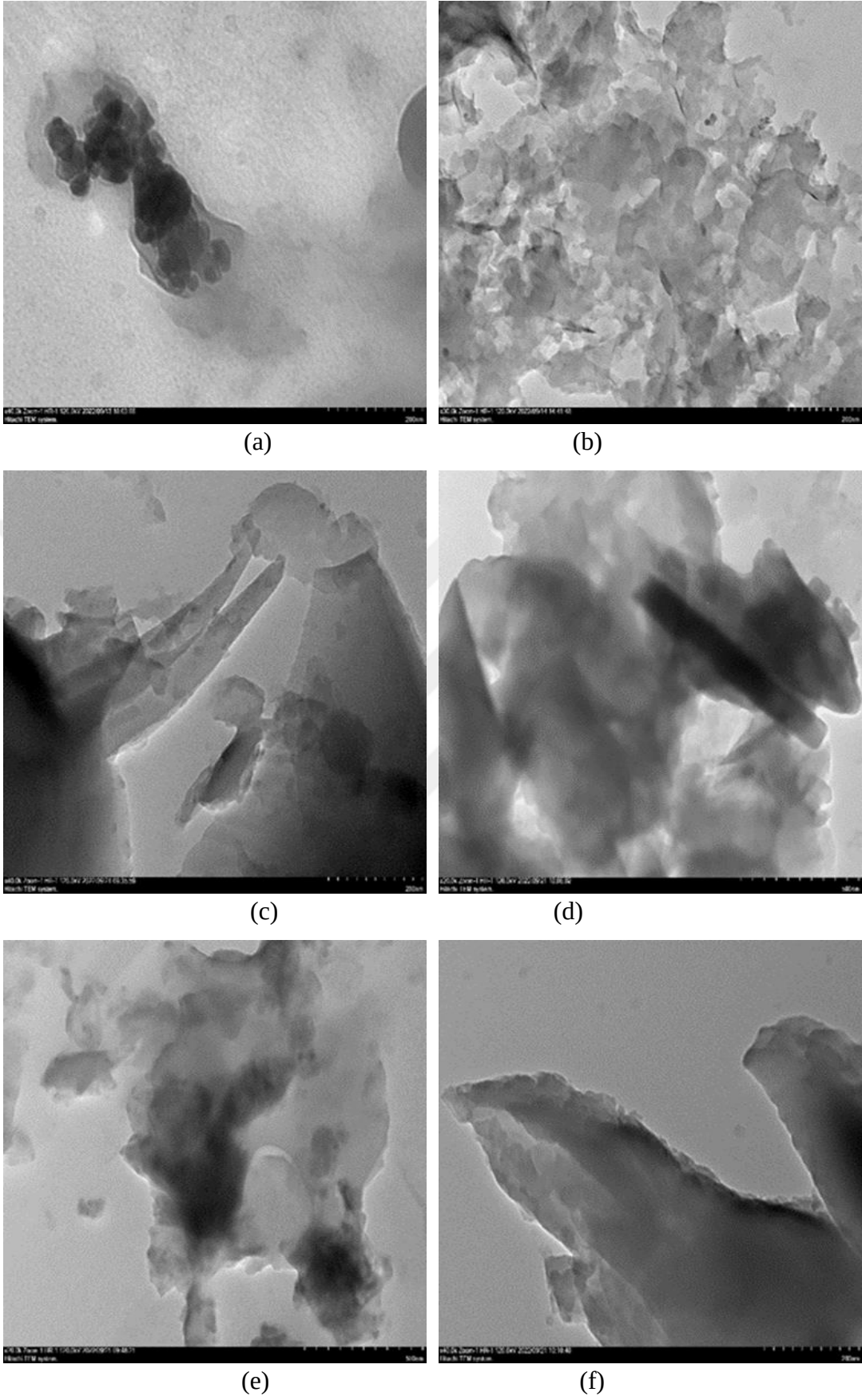
Melamin Formaldehit Ön-Polimer (MF), MF-Organokil Nanokompozit ve Hibrit Kompozitlere Ait Bulgular

Ham montmorillonit (MMT), organo-montmorillonit (OMMT), melamin formaldehit köpük (MF), melamin formaldehit organokil nanokompozit (MAFKNK) ve hibrit kompozitlerin dokusal karakterizasyonu

Ham montmorillonit (MMT), organomontmorillonit (OMMT) ve ham pomzanın dokusal yapılarındaki farklılıkları karşılaştırmak ve liyofilizasyon için yapılan modifikasyonun etkinliğini görmek amacıyla her ikisinin de HRTEM görüntüleri alınmış ve sırasıyla Şekil 37a ve 37b’de verilmiştir. HRTEM görüntülerinde görülen koyu uzun lifli çizgiler, 2:1 katmanlı yapılarıyla kil tabakalarını işaret etmektedir.



Şekil 37. Ham montmorillonit (MMT) (a) ve organomontmorillonit (OMMT) (b)’nin HRTEM görüntüleri

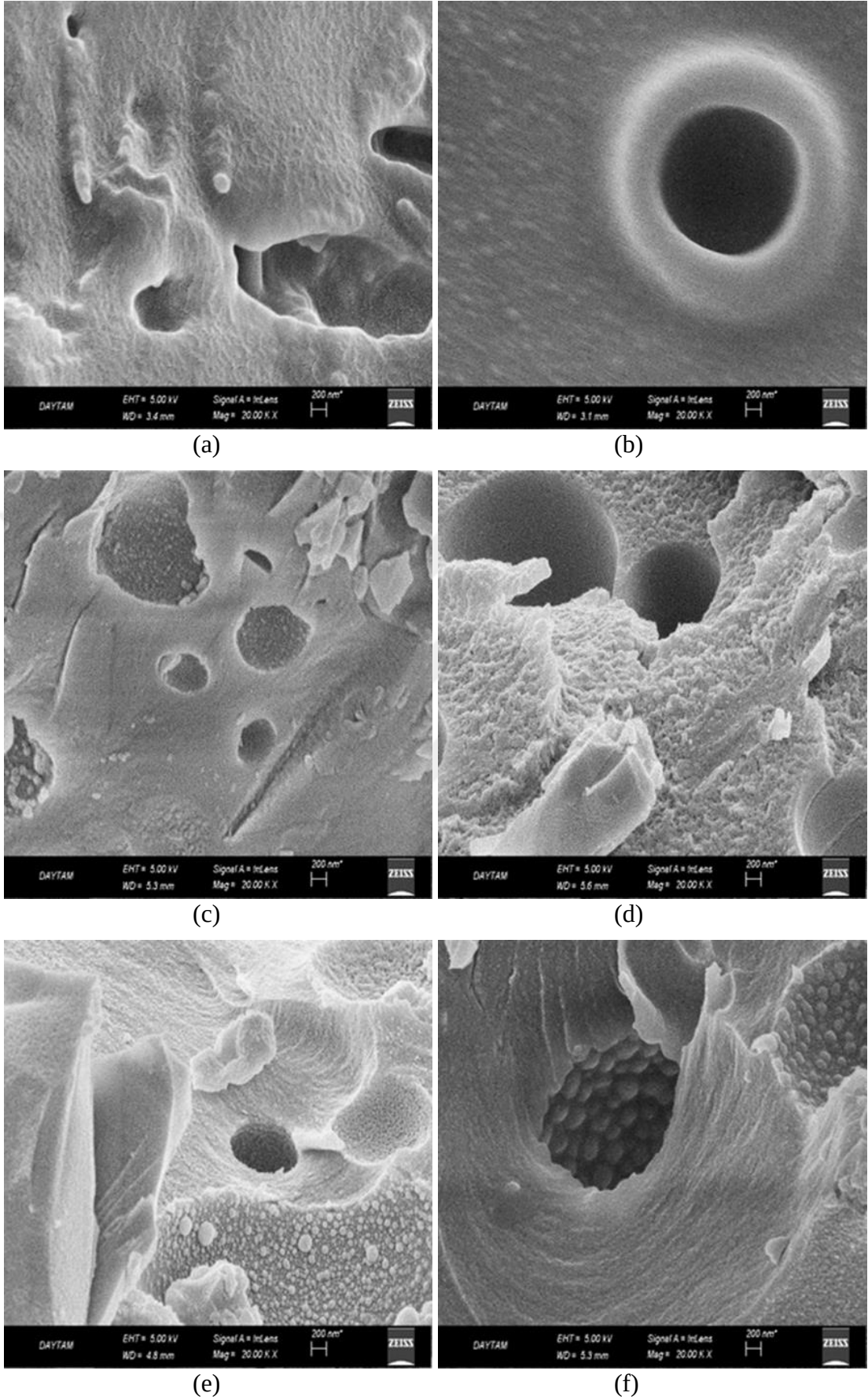


Şekil 38. Saf melamin formaldehit reçinesi (MF) (a), MF-organokil (MFKNK) (b), MF-organokil-pomza (MFKPHK) (c), MF-organokil-pomza-alçı (MFKPAHK) (d), MF-organokil-pomza-kaolin (MFKPKHK) (e) ve MF-organokil-pomza-içi boş cam küre (MFKPCHK) (f) hibrit kompozitlerinin HRTEM görüntüleri

Şekil 38a'dan, saf melamin formaldehit köpüğün bir araya toplanmış mikroküreler halinde oluştuğu ve agregatların üç boyutta geliştiği görülebilmektedir (Naresh *et al.* 2022). Bu dokusal düzenleme, sertleşmeden önce mikrodalga ısınlama destekli köpükleştirme yönteminin kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 38b, organokil tabakalarının polimer matriks içine pul pul dağılmasından dolayı, MF molekülü kümelerinin küresel yapılarını koruyarak düzenli olarak seyrekleştiğini veya ayrıştığını göstermektedir (Gürses ve Barın, 2023). Şekil 38c'de pomza taneciklerinin MF molekülüleri arasına dağıldığı görülmektedir (Gürses *et al.* 2023). Şekil 38d'deki MF-organokil-pomza-alçı hibrit kompozitinin (MFKPAHK) HRTEM görüntüsünden, nispeten düzenli alçı plakalarının, camsı bir yapıya sahip pomza plakalarının yanında heterojen bir şekilde dağıldığı görülmekte ve parçacıklar belirgin şekilde deforme olmuş polimer organokil nanokompozit küreler ile çevrelenmiştir (Jia *et al.* 2022). Öte yandan, Şekil 38e'deki MF-organokil-kaolin hibrit kompozitin (MFKPKHK) görüntüsünde kaba dokulu camsı pomza levhaların, küresel polimer kil nanokompozitlerinin ve kaolin levhaların etkili bir performans sergileyebildiği görülmektedir (Hong *et al.* 2012). Şekil 38f'deki MF-organokil-içi boş cam-küre hibrit kompozitinin (MFKPCHK) HRTEM görüntüsü, pomza plakalarının, küresel polimer kil ile kapsüllenmiş içi boş cam kürelerin dâhil edilmesiyle nanokompozitlerin daha düzenli ve nispeten tekdüze bir yönelim sergilediğini göstermektedir (Luo *et al.* 2012).

Melamin formaldehit köpük (MF), melamin formaldehit organokil nanokompoziti (MFKNK) ve hibrit kompozitlerin yüzey morfolojik karakterizasyonu

Saf melamin formaldehit köpük (MF), MF-organokil nanokompoziti (MFKNK) ve MF-organokil-pomza (MFKPHK), MF-organokil-pomza-alçı (MFKPAHK), MF-organokil-pomza-kaolin (MFKPKHK) ve MF-organokil-pomza-içi boş cam küre (MFKPCHK) hibrit kompozitleri için alınan SEM desenleri Şekil 39'da verilmiştir.

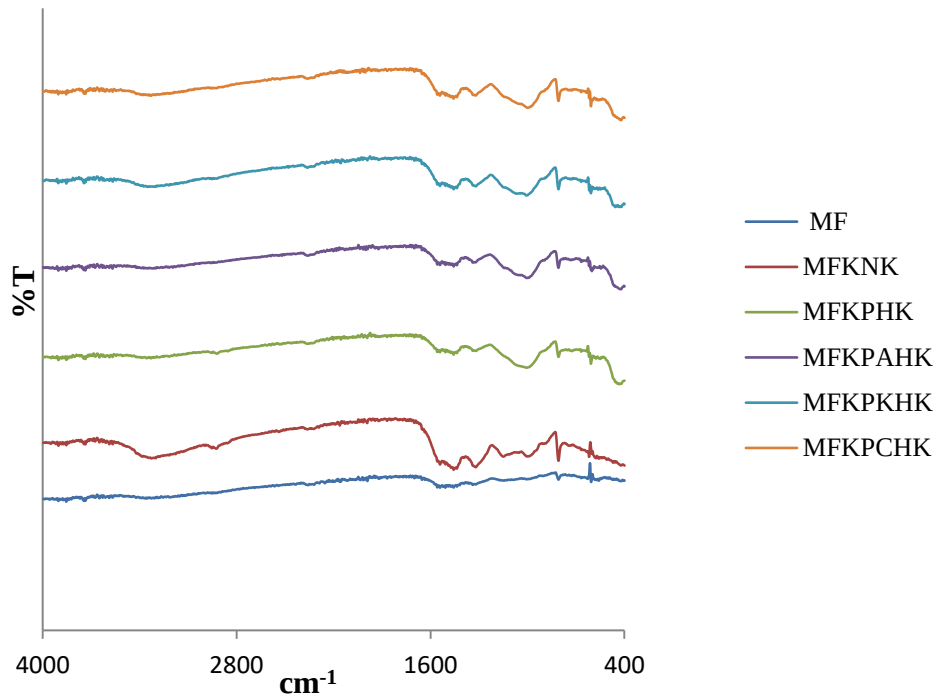


Şekil 39. Saf melamin formaldehit reçinesi (MF) (a), MF-organokil nano-kompoziti (MFKNK) (b), MF-organokil-pomza (MFKPHK) (c), MF-organokil-pomza-alçı (MFKPAHK) (d), MF-organokil-pomza-kaolin (MFKPKHK) (e) ve MF-organokil-pomza-içi boş cam küre (MFKPCHK) (f) hibrit kompozitlerin SEM desenleri

Şekil 39a'nın, saf melamin formaldehit köpük (MF) deseninin, mikroküre kümelerinin üç boyutlu dallanmış yapılar olarak geliştiğini gösteren yüzey morfolojisini açıkça yansıttığı görülebilir (Gao *et al.* 2020; Nemanič *et al.* 2014). Şekil 39b, organokil tabakalarının polimer matris içine pul pul dökülmesinden dolayı küresel yapılarını koruyarak, dallanmış yapının neredeyse kaybolduğu ve MF molekül kümelerinin düzenli istiflenmesini gösteren bir yüzey morfolojisini ortaya koymaktadır. Şekil 39c'de MF-organokil-pomza kompozitinin (MFKPHK) SEM deseninde, vesiküler kaba dokulu ve camsı yapıya sahip pomzanın, mikro yapısı da dahil olmak üzere boşluklarda küresel polimer organokil nanokompozitleri ile kaplı bir yüzey morfolojisi sergilediği görülmektedir (Razaghi *et al.* 2007; Sever *et al.* 2019). Şekil 39d'deki MF-organokil-pomza-alçı hibrit kompozitinin (MFKPAHK) SEM deseni, gözenekli pomza plakalarındaki boşluklarda ve yüzeyel kıvrımlarda polimer-kil nanokompozit küreler tarafından oluşturulan düzenli kırıklar bir kaplamayı ima eden morfolojik yapıyı gösterir. Bu şekilde de yine pürüzlü bir yüzey görünümünün ortaya çıktığı, boyut olarak heterojen aglomeraların varlığına işaret ettiği görülmektedir. Bu görünümün, polimer kil nanokompozit kürelerle çevrelenmiş camsı pomza plakaları, alçı plaka kırıkları ve bunların istiflenmiş formlarının varlığıyla ilişkili olduğu ileri sürülebilir (Erbs *et al.* 2018). Şekil 39e'deki MF-organokil-kaolin hibrit kompozitin (MFKPKHK) görüntüsü, kaba dokulu camsı pomza plakalarının, küresel polimer-organokil nanokompozitlerinin farklı şekillerde düzenlenmiş kaolin katmanları ile oldukça düzgün bir birleşimini gösteren bir yüzey morfolojisi sergilediğini göstermektedir. Öte yandan, Şekil 39f, bir arada kümelenmiş içi boş cam kürelerin düzenli ve nispeten lokalize bir düzenlemesinin ve pomza plakaları ve kaolin katmanları ile düzgün bir şekilde çevrelenmiş küresel polimer-organokil nanokompozitlerinin görüldüğü bir yüzey morfolojisini göstermektedir (Sarma *et al.* 2019; Zhang *et al.* 2021).

Melamin formaldehit reçinesi (MF), melamin formaldehit organokil nanokompozit (MFKNK) ve hibrit kompozitlerin FT-IR spektrumlarının analizi

Saf melamin formaldehit reçinesinin (MF), MF-organokil nanokompozitinin (MFKNK) ve MF-organokil-pomza (MFKPHK), MF-organokil-pomza-alçı (MFKPAHK), MF-organokil-pomza-kaolin (MFKPKHK) ve MF-organokil-pomza-içi boş cam küre (MFKPCHK) hibrit kompozitlerinin FT-IR spektrumları Şekil 40'da verilmiştir.



Şekil 40. Saf melamin formaldehit reçinesi, MF-organokil nanokompoziti ve çeşitli hibrit kompozitlerin FT-IR spektrumları.

Şekil 40'da MF-organokil nanokompozitinin (MFKNK) FT-IR spektrumunda, CTAB'den gelen 3354 cm^{-1} 'deki güçlü pikin dışında, 2926 , 2914 ve 2881 cm^{-1} 'de üç pik daha ortaya çıkmıştır ki bunlar ikincil amin grubu gerilme, C-H anti-gerilme ve C-H gerilme pikleridir (Chen *et al.* 2015). Tüm bu spesifik pikler, kil katmanları ve uzun zincirli hidrokarbon molekülleri tarafından bağlanan CTA^+ iyonları arasındaki etkileşimler nedeniyle hem daha düşük yoğunlukta ortaya çıkmakta hem de daha düşük değerlere kaymaktadır. Ayrıca CTAB'ün C-N gerilmesine ve N-H bükülmesine karşılık gelen sırasıyla 1454 cm^{-1} ve 1129 cm^{-1} 'de iki pik gözlemlendi. Öte yandan $1302\text{--}1657\text{ cm}^{-1}$ bölgesinde ortaya çıkan piklerin CH_2 kayma titreşim modu ve bağlı baş grup etrafındaki su molekülünün O-H bükülme modundan kaynaklandığı iddia edilebilir. Si-O ve Al-OH, 1000 cm^{-1} ile 500 cm^{-1} aralığında gözlenen ana fonksiyonel gruplardır. 866 cm^{-1} 'deki pik Al-OH bükülme titreşimlerine karşılık gelirken, 802 cm^{-1} 'de SiO_2 'deki çift Si-O-Si bağları ve $714\text{--}617\text{ cm}^{-1}$ civarında gözlenen Si-O gerilme titreşimleri kuvarsın varlığına işaret etmektedir. $3356\text{--}3730\text{ cm}^{-1}$ civarındaki güçlü bantlar hidroksil bağlarının varlığını gösterir. Bu piklerin düşük yoğunlukta ve spesifik değerlerinden kaymış olarak ortaya çıkması, kil plakaları ile uzun zincirli hidrokarbona bağlı CTA^+ iyonları arasındaki yoğun etkileşimlerin de göstergesi olabilir (Gürses *et al.* 2015; Wanyika *et al.* 2016).

Şekil 40'daki MF-organokil-pomza kompozitinin (MFKPHK) FT-IR spektrumunda, organokil ve MF orjinli karakteristik piklerin yanı sıra, Al-OH bükülme titreşimlerine karşılık gelen hafif kaymış ve düşük yoğunluklu pikler bulunmaktadır ve Si-O gerilme titreşimleri 905

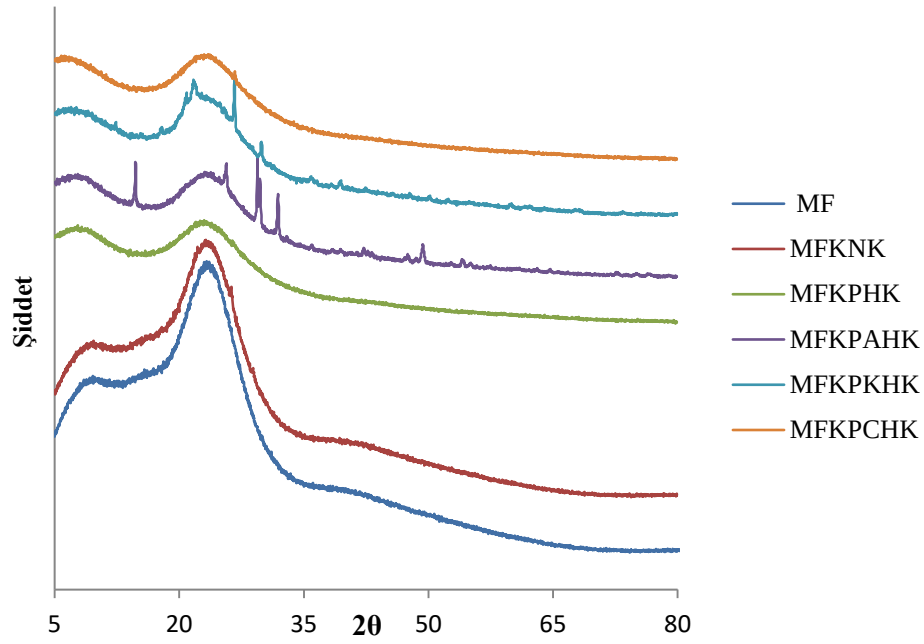
ve 757-635 cm^{-1} 'de ortaya çıkmaktadır. Diğer spektrumlara benzer şekilde 3761 cm^{-1} civarındaki pik sudan kaynaklanan hidroksil gruplarının varlığına işaret etmektedir (Khorzughy *et al.* 2015; Sever *et al.* 2019). Daha düşük pik yoğunlukları ve kaymalar, bu hibrit kompozitin HRTEM görüntülerinde de ima edildiği gibi, pomza levhaları ve organokil katmanları arasındaki etkili etkileşimlere atfedilebilir.

Şekil 40'daki MF-organokil-pomza-alçı hibrit kompozitinin (MFKPAHK) FT-IR spektrumu, yalnızca pomza içeren kompozitin spektrumuna çok yakın bir benzerlik göstermektedir. Bu, nispeten düzenli alçı levhaların pomza levhalarının yanında heterojen bir şekilde dağıldığını ve parçacıkların deforme olmuş polimer organokil nanokompozit kürelerle çevrelendiğini gösteren HRTEM görüntüsüyle uyumludur. Ancak spektrumun aynı zamanda sülfat grubunun gerilme ve bükülme modlarına karşılık gelen 663 ve 598 cm^{-1} 'deki pikleri ve 1022 ve 2337 cm^{-1} 'deki diğer düşük yoğunluklu karakteristik pikleri de içerdiği görülebilir.

Öte yandan, Şekil 40'daki MF-organokil-pomza-kaolin (MFKPKHK) ve MF-organokil-pomza-içi boş cam küre (MFKPCHK) hibrit kompozitlerinin FT-IR spektrumları oldukça benzer görünüyor. Etkileşimlerin doğası açısından bu, pomza plakalarının, küresel polimer kil nanokompozitlerinin ve kaolin plakaların verimli bir harmanlama sergilemesi ve pomza plakalarının içi boş cam kürelerin dahil edilmesiyle daha düzenli küresel polimer-organokil nanokompozitleri tarafından kapsüllenmiştir ve nispeten tekdüze bir yönelme göstermesi bulgusuyla tutarlıdır. Ancak 3759, 3639, 3580 ve 3578 cm^{-1} 'deki düşük yoğunluklu fakat karakteristik piklerin kaolinin düzenli yapısını gösterdiği ileri sürülebilir. Kaolin içeren kompozitin spektrumunda 1112 cm^{-1} , 1074 cm^{-1} ve 1016 cm^{-1} 'deki pikler Si-O gerilme modlarıdır ve 1112 ve 1016 cm^{-1} 'deki pikler simetrik ve anti- Si-O bağlarının simetrik gerilmesidir. Her iki kompozitin spektrumlarında görülen 418 cm^{-1} civarındaki pik ve 3435 cm^{-1} civarındaki pik ve 1632 cm^{-1} civarındaki düşük yoğunluklu pik, sırasıyla bir O-Al-O bükülmesine ve bir OH bükülmesine atfedilebilir (Luo *et al.* 2012; Tironi *et al.* 2012; Ahmed *et al.* 2018; Gao *et al.* 2020; Kumar *et al.* 2020).

Melamin formaldehit reçinesi (MF), melamin formaldehit organokil nanokompozit (MFKNK) ve hibrit kompozitlerin mineralojik yapılarının karakterizasyonu

Şekil 41, saf melamin formaldehit köpük (MF), MF-organokil nanokompozitinin (MFKNK) ve MF-organokil-pomza (MFKPHK), MF-organokil-pomza-alçı (MFKPAHK), MF-organokil-pomza-kaolin (MFKPKHK) ve MF-organokil-pomza-içi boş cam küre (MFKPCHK) gibi hibrit kompozitlerin XRD kırınımalarını göstermektedir.



Şekil 41. Saf melamin formaldehit reçinesi, MF-organokil nanokompozit ve çeşitli hibrit kompozitlerin XRD difraktogramları

Şekil 41, MF köpüğün XRD deseninde, amorf bir yapıya işaret eden, $9,4^\circ$ ve $23,8^\circ$ 'de iki tipik geniş pikin ortaya çıktığını göstermektedir. Bu, melaminin formaldehit reçinesinin metilol monomerlerinden oluştuğu ve polimerik omurganın yayılımının gerçekleştiği anlamına gelir. Şekil 41'de, MF reçinesinin iki zirvesinden küçük olanının, $8,1^\circ$ 'deki karakteristik smektit zirvesiyle kısmen örtüştüğü görülebilmektedir (Gürses *et al.* 2015; Yu *et al.* 2014). Bu sola kaymış ve büyümüş smektit piki, polimer moleküllerinin kilin ara katman boşluğunda birleştiğini ve nanokompozitin oluştuğunu açıkça göstermektedir. Şekil 38b'deki HRTEM görüntüsü de bu iddiayı desteklemektedir. Şekil 41'deki MF-organokil-pomza kompozitinin (MFKPHK) XRD difraktogramı, pomzanın amorf yapısını yansıtan ve muhtemelen MF pikiyle örtüşen, $23,2^\circ$ 'de daha geniş ve daha kısa pik yüksekliğine sahip bir piki göstermektedir. Ek olarak, aynı düzende $7,2^\circ$ 'de daha fazla sola kaymış gibi görünen smektit piki, katmanlar arası boşlukta polimer zincirlerinin daha fazla bulunduğunu gösterir (Sever *et al.* 2019; Khorzughy *et al.* 2015).

Şekil 41'deki MF-organokil-pomza-alçı hibrit kompozitinin (MFKPAHK) XRD difraktogramından, dihidrat kalsiyum sülfat ($14,6^\circ$ ve $25,8^\circ$ 'de) ve Bassanit ($47,9^\circ$, $49,5^\circ$ ve $50,5^\circ$ 'de) ana mineral fazı olarak kalsit ($36,3^\circ$) ve belirli oranlarda anhidrit kristalleri görülebilir (Sakae *et al.* 2007; Hossain *et al.* 2022). Ayrıca, aynı difraktogram, üst üste binen pomza ve MF piklerini ve $6,5^\circ$ 'lik bir smektit pikini içerir ve organokil katmanlarının neredeyse pul pul döküldüğünü gösterir. Bu bulgular, nispeten düzenli alçı levhaların, farklı fazların mevcut olduğu camsı bir yapıya sahip pomza levhalarının yanında heterojen bir şekilde dağıldığını ve

ayrıca kil tabakalarının MF matrisinde pul pul döküldüğünü gösteren HRTEM görüntüsüyle uyumludur (Sepehr *et al.* 2013; Guler ve Sarioglu, 2014;).

Şekil 41'deki MF-organokil-kaolin hibrit kompozitinin (MFKPKHK) XRD difraktogramı, 12,2° ve 26,9°'de kaolinin iyi tanımlanmış ve karakteristik piklerini göstermektedir. Öte yandan, bu difraktogramdan MF ve pomza piklerinin üst üste bindiği ve smektit pikinin daha sola kaydırıldığı görülebilir, bu da organokil levhacıklarının polimer matris içinde iyi bir şekilde pul pul döküldüğünü gösterir. Ayrıca 30-36° ve 39,1°'ye karşılık gelen pikler kaolinin diğer mineral bileşenlerini yansıtmaktadır. Böylece pomza levhaların, küresel polimer organokil nanokompozitlerinin ve kaolin levhaların arayüzey uyumluluğu nedeniyle etkili karışım sergileyebildiği söylenebilir (Gardolinski and Lagaly 2005; Tironi *et al.* 2012;).

Şekil 41'deki MF-organokil-pomza-içi boş cam-küre hibrit kompozitinin (MFKPCHK) XRD difraktogramı, üst üste binen MF, pomza ve amorf silika piklerini ve smektit pikinin neredeyse kaybolduğunu göstermektedir. Böylece, beklendiği gibi, küresel polimer organokil nanokompozitleri tarafından kapsüllenene pomza plakaları ve içi boş cam küreler, düzenli ve nispeten ayırık bir düzenleme sergilediği söylenebilir (Yu *et al.* 2014; Schwinger *et al.* 2019; Sarma *et al.* 2021).

Melamin formaldehit köpük (MF), melamin formaldehit organokil nanokompozit (MFKNK) ve çeşitli hibrit kompozitlerin ısı iletkenlikleri

Isıl iletkenlik, bir malzemenin sabit koşullar altında ısı performansını değerlendirmek için önemli bir göstergedir. Malzemelerin ısı yalıtım performanslarının değerlendirilmesinde farklı numuneler için ölçülen ısı iletkenlik katsayıları dikkate alınmıştır (Amaral *et al.* 2017). Bu çalışmada ana matris ve bağlayıcı olarak melamin formaldehit reçinesi ve organokil kullanılarak hazırlanan nano kompoziti kullanılmıştır. Ana dolgu malzemesi olarak pomza kullanılırken, özellikle kırılma ve ufalanabilir malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla alçı, kaolinit ve içi boş cam küre gibi ikincil dolgu maddelerinin belirli oranlarda eklenmesiyle çeşitli hibrit kompozitler hazırlanmıştır. Saf melamin formaldehit köpük (MF), MF-organokil nanokompoziti (MFKNK) ve MF-organokil-pomza (MFKPHK) ve MF-organokil-pomza- alçı (MFKPAHK), MF-organokil-pomza-kaolin (MFKPKHK) ve MF-organokil-pomza-içi boş cam küre (MFKPCHK) gibi hibrit kompozitlerin termal iletkenlik katsayıları Tablo 13'te gösterilmektedir.

Tablo 13. Saf Melamin Formaldehit Reçinesi, MF-organokil Nanokompoziti ve Çeşitli Hibrit Kompozitlerin Termal İletkenliklerinin Analiz Sonuçları

Örnek Kodları	Isı İletim Katsayısı (λ) (W/m K)	Standart Sapma
MF (Melamin formaldehit köpük)	0,0826	0,0012
MFKNK (MF-organokil-nano kompozit)	0,0640	0,0047
MFKPHK (MF-organokil-pomza-hibrit kompozit)	0,1003	0,0041
MFKPAHK (MF-organokil-pomza-alçı-hibrit kompozit)	0,0763	0,0019
MFKPKHK (MF-organokil-pomza-kaolin-hibrit kompozit)	0,0915	0,0012
MFKPCHK (MF-organokil-pomza-içi boş cam küre-hibrit kompozit)	0,0642	0,0025

Bu tablo, en düşük ısı iletkenlik katsayılarının sırasıyla, MF-organokil nanokompozit (MFKNK) ve MF-organokil-pomza-içi boş cam-küre hibrit kompozitte (MFKPCHK) elde edildiğini göstermektedir. Buna karşılık, MF-organokil-pomza (MFKPHK) ve MF-organokil-pomza-kaolin (MFKPKHK) hibrit kompozit ve saf melamin formaldehit köpük (MF) kompozitinde daha yüksek termal iletkenlik katsayıları gözlenmiştir. Kompozitlerin ısı iletkenliği doğası gereği anizotropiktir ve bunların doğru tasarımı kompozitlerin ısı iletkenliği hakkında bilgi sahibi olmayı gerektirir. Reçinelerin termal iletkenliğine ilişkin veriler, kürleme sırasında kompozitlerin büzülmesinden ve termal genleşme katsayılarındaki uyumsuzluktan kaynaklanan gerilimlerin azaltılmasını kolaylaştırır. Matris malzemeleri metal, mineral, seramik ve polimer gibi farklı tiplerde olabilir. Termoplastik veya termoset olabilen polimer matrisler, maliyet verimliliği ve üretim kolaylığı nedeniyle en yaygın kullanılanlardır ve ayrıca diğer matrislerle karşılaştırıldığında mükemmel oda sıcaklığı özelliklerine sahiptirler (Frontini and Pouzada 2015). Termoset matrisler, bir reçinenin amorf çapraz bağlı bir polimer matrisine geri dönüşü olmayan kimyasal reaksiyonuyla sentezlenir. Termoset reçineler, geniş moleküler yapılarından dolayı iyi bir elektrik ve ısı yalıtımı sağlar. Termosetler, diğer katkı maddelerinin uygun şekilde ıslatılmasına, mükemmel termal stabiliteye ve daha iyi sürünme direncine olanak tanıyan düşük bir viskoziteye sahiptir. Termoset reçineler çok çeşitli özellikler verecek şekilde formüle edilebilir. Melamin formaldehit reçinesi, reaksiyon sırasında su üreten kondenzasyon reaksiyonu yoluyla sertleşir ve kürlendikten sonra düşük büzülme sergiler, iyi kimyasal dirence

ve mükemmel mekanik özelliklere sahiptir. Aynı zamanda yüksek sıcaklık ve sürünme direnci, iyi ısı yalıtımı ve ses sönümleme özelliklerinin yanı sıra üstün alev geciktirici özellikler gibi mükemmel özelliklere de sahiptir (Nemaniç *et al.* 2015; Wang *et al.* 2015).

Isı iletiminin azalması veya ısı yalıtımının baskınlığı, kondüksiyonun, konveksiyonun, radyasyonun veya üçünün birden sınırlandırılmasıyla ısı akışının azaltılmasına bağlıdır. Isı yalıtım malzemeleri lifli, hücresel ve granüler olarak kategorize edilebilecek üç genel tipte sınıflandırılabilir. Lifli yalıtımlar hava boşluğunu ince bir şekilde bölen küçük çaplı liflerden oluşur. Lifler yalıtılmış yüzeye dik veya paralel olabilir ve birbirine bağlanmış veya bağlanmamış olabilir. Silika, cam, taş yünü, cüruf yünü ve alümina silika lifleri kullanılmaktadır. Bu tipte en yaygın kullanılan yalıtımlar cam elyafı ve mineral yündür. Hücresel izolasyonlar birbirinden ayrılmış küçük ayrı hücreler içerir ve cam veya polistiren (kapalı hücre) ve diğer polimerik köpükler tipik örneklerdir. Granül yalıtkanlar boşluklar veya oyuklar içeren küçük yumrulara sahiptir ve boşluklar arasında malzeme aktarımı olabileceğinden bunlar gerçek hücresel malzemeler olarak kabul edilmez. Kalsiyum silikat, genleştirilmiş vermikülit, perlit, pomza, alçı taşı, selüloz, diatomlu toprak ve genişletilmiş polistiren gibi granüler yalıtımlar, gevşek veya ufalanan bir malzeme olarak üretilebilir, ancak sert bir yalıtım malzemesi oluşturmak için bir bağlayıcı ve elyafı birleştirilebilir (Sova 2021).

Termal iletkenlik, polimer arayüzey-dolgu maddesi özellikleriyle güçlü bir şekilde ilişkilidir. Farklı dolgu maddelerinin kullanımı veya dolgu maddelerinin kimyasal modifikasyonu, polimer-dolgu maddesi arayüzey etkileşimlerini geliştirmek için yaygın olarak kullanılabilir (Ma *et al.* 2021). Geliştirilmiş matris-dolgu maddesi afinitesi, arayüzey çekim etkileşimlerinin etkinliğini artırabilir ve polimer ve nano dolgulu nanokompozitlerde olduğu gibi, arayüzey enerjisini önemli ölçüde azaltabilir (Almuallim *et al.* 2022).

Termoset melamin formaldehit matrisinde, organokil levhacıklarının pul pul dökülmesi ve solvent ve polimer zincir arayüzey enerjisinin azaltılması nedeniyle köpükleme sırasında düzenli küresel kümeler oluşturulmuştur, bu da çok yüksek bir ısı yalıtım performansı ve daha düşük bir ısı iletkenliği ile sonuçlanmıştır.

Pomza plakalarının, küresel polimer kil nanokompozitleri tarafından kapsüllenmiş içi boş cam kürelerin eklenmesiyle daha düzenli ve nispeten tekdüze bir düzenleme sergilediği kompozitte, pomza taşının varlığının ısı yalıtımı açısından olumsuz etkisi, içi boş cam küreler ve böylece granül yalıtım türleri ile ikinci en düşük ısı iletkenlik katsayısı elde edilmiştir (Uysal *et al.* 2004). Nispeten düzenli alçı levhaların, camsı yapıya sahip pomza levhaların yanında, heterojen olarak dağılmış ve önemli ölçüde deforme olmuş polimer kil nanokompozit küreleri ile çevrelendiği alçı içeren kompozit, nispeten yüksek bir ısı yalıtım performansı sergilemiştir.

Bu durum, deforme olmuş nanokompozit kürelerin, pul pul dökülmüş organokil levhacıkların fibril yapıları boyunca ısı akışını engellemesi gerçeğiyle açıklanabilir (Romero-Gómez *et al.* 2022). Kaba dokulu camsı pomza levhalar, küresel polimer organokil nanokompozit ve kaolin levhaların etkili bir karışım sergilediği kaolin içeren kompozit, buna paralel olarak daha düşük boşluk oranı ve daha yüksek ısıl iletkenlik katsayısı ve dolayısıyla daha düşük bir ısı yalıtım performansı göstermiştir (Michot *et al.* 2008).

Hibrit kompozitlerin yoğunluklarının, eğilme dayanımlarının, elastikiyet modüllerinin ve vida tutma dayanımlarının bileşimlerine bağlılığı

Tablo 14, MF-organokil-pomza (MFKPHK), MF-organokil-pomza-alçı (MFKPAHK), MF-organokil – pomza – kaolin (MFKPKHK) ve MF-organokil-pomza taşı-ıçi boş cam küre (MFKPCHK) gibi hibrit kompozitlerin yoğunluk, bükülme mukavemeti, elastiklik modülü ve vida tutma mukavemetinin karşılaştırmasını göstermektedir. Tablo 14’te hibrit kompozitlerin bulk yoğunluklarının (MFKPCHK) <(MFKPKHK) <(MFKPHK) <(MFKPAHK) sırasını takip ettiği görülebilir. Beklendiği gibi en düşük yoğunluk içi boş cam küre içeren kompozitte, en yüksek yoğunluk ise alçı içeren kompozitte bulunmuştur. Alçı içeren kompozitte, organokil nanokompozitin küresel kümelerinin deformasyonu, daha sert ve kompakt bir yapıya ve dolayısıyla daha yüksek bir yoğunluğa neden oldu. Kısmen şişen kaolin ile reçine ara katmanını içeren kompozit, genişleyen hacme paralel olarak biraz daha küçük bir yoğunluk sergilemiştir. Kompozit yığının yoğunluğu, reçine-kompozit içeriğine bağlı olmanın yanı sıra, bükülme mukavemeti, elastiklik modülü ve vida tutma mukavemeti gibi mekanik özelliklerde de belirleyicidir (Jorda *et al.* 2021).

Tablo 14. Hibrit Kompozitlerin Yoğunluk, Eğilme Mukavemeti, Elastisite Modülü ve Vida Tutma Mukavemetlerinin Bileşimlerine Göre Değişimi

Örnek Kodları	Yoğunluk (g /cm ³)	Eğilme Mukavemeti (MPa)	Standart Sapma	Vida Tutma Dayanımı (N/mm ²)	Standart Sapma	Elastisite Modülü (MPa)	Standart Sapma
MFKPHK	0,41	270,69	3,1	3,59	0,03	2,0	0,10
MFKPAHK	0,51	116,72	3,0	0,16	0,02	0,75	0,05
MFKPKHK	0,39	250,36	4,0	2,52	0,06	1,80	0,20
MFKPCHK	0,36	228,41	7,0	3,59	0,09	2,22	0,30

Tablo 14’ten görüleceği üzere dört hibrit kompozitin en yüksek eğilme mukavemeti sadece pomza içeren numunede, en düşük mukavemet ise alçı içeren numunede gözlenmiştir.

Nispeten düşük yoğunluğu ve kaba dokulu camsı pomza plakaları, küresel polimer organokil nanokompozitleri ve farklı yönlerde ancak düzenli olarak düzenlenmiş kaolin katmanları arasında oldukça etkili tanecikler arası etkileşimi gösteren bir yüzey morfolojisi ile kaolin içeren kompozit, çok yüksek bir bükülme mukavemeti sergilemiştir (Kwon *et al.* 2023). Buna karşılık, düzenlenmiş kaolin katmanları, pomza plakaları ve küresel polimer organokil nanokompozitleri ile etkili bir şekilde çevrelenen kümelenmiş içi boş cam küreler tarafından oluşturulan bir yüzey morfolojisine sahip, nispeten düşük darbe mukavemetli içi boş cam küreler içeren düşük yoğunluklu kompozit, son derece yüksek bir bükülmeye sahiptir. Bu, çok verimli bir arayüzey uyumluluğu anlamına gelebilir (Wang *et al.* 2023). Alçı içeren kompozitin düşük bükülme mukavemeti, morfolojik yapısından dolayı beklenen bir mekanik davranıştır; bu plakalar ve heterojen toprakların varlığı gözenekli pomzanın boşluklarında ve yüzeyel kıvrımlarında veya kırıklarında polimer kil nanokompozit kürelerin yapılanmasını gösterir (He *et al.* 2023).

Tablo 14'te sunulan kompozitlerin elastisite modülünün MFKPCHK> MFKPHK> MFKPKHK> MFKPAHK sırasını takip ettiği görülebilir. Bu tablo vida tutma mukavemetlerinin de benzer bir sıra izlediğini göstermektedir. Bu yakın benzerlikten, yalnızca pomza ve içi boş cam küre içeren kompozitlerin yüksek performansa ve yüksek tokluğa sahip sünek malzemeler olduğu sonucuna varılabilir (Hariyadi *et al.* 2015). Öte yandan sadece pomza ve içi boş cam küre içeren kompozitlerin ısı iletkenlik değerleri karşılaştırıldığında, Tablo 13'ten pomza içeren kompozitin içi boş cam küre içeren kompozite göre yaklaşık iki kat daha yüksek bir değere sahip olduğu görülmektedir. Böylece pomza içeren kompozit yüksek oranda gözenekli bir yapı içermese de elastikiyetinin ve vida tutma direncinin yüksek olması oldukça stabil bir ağ yapısının oluşturulmasıyla açıklanabilir. Hem düşük elastisite modülü hem de çok düşük vida tutma direnci, alçı içeren kompozitin kararsız dokusal yapıya sahip kırılğan bir malzeme olduğunu göstermektedir (Huang *et al.* 1993). Sonuç olarak içi boş cam küre içeren kompozitin hem ısı yalıtımı hem de mekanik dayanım açısından en uygun hibrit kompozit olduğu ileri sürülebilir.

SONUÇLAR

Bu çalışmada, ısıtıl işlemle birleştirilmiş mikrodalga ısınlama tekniği kullanılarak melamin formaldehit ve melamin formaldehit organokil nanokompozit köpükler hazırlandı ve karakterize edildi. Hazırlanan kompozitlerin organokil oranındaki artışa bağlı olarak basınç ve dayanım değerleri incelenmiştir. Saf MF'ye göre artan organokil oranı ile farklı miktarlarda organokili içeren kompozitlerin dokusal yapılarında daha önemli değişikliklerin meydana geldiği tespit edilmiştir. Düşük organokil içeren nanokompozitte (MFKNK1), kısmi agregasyon sergilemelerine rağmen levhacıkların ağırlıklı olarak pul pul döküldüğü, ancak kompozitin dokusal yapısının hala saf MF'ninkine benzer olduğu gözlemlendi. Daha yüksek organokil oranlarına (MFKNK2 ve MFKNK3) sahip kompozitlerde, organokil plakaları neredeyse tamamen pul pul dökülmüş ve bu da çok daha düzgün bir düzenlemeyle sonuçlanmıştır. Yüksek organokil oranlarıyla hazırlanan MF nanokompozit köpüklerin yüzey morfolojileri, mikrokürelerin yoğun ve oldukça etkili tutarlı kümeler halinde bütünsel bir yapı oluşturduğunu gösterdi. En yüksek miktarda organokil içeren nanokompozit köpüğün (MFKNK3) mikrokürelerinin daha yüksek yüzey alanına ve daha küçük boyutlara sahip olduğu, bunun sonucunda daha az bir topaklanma ve dolayısıyla daha düzgün ve bütünsel bir yapı elde edildiği belirlendi. İşlenmemiş MF ve nano kompozitlerin XRD kırınım diyagramları karşılaştırıldığında, nano kompozit durumunda, MF köpüğünün iki pikinden küçük olanının, $8,1^\circ$ 'deki karakteristik smektit zirvesiyle kısmen örtüştüğü görüldü. Bu sola kaymış veya önemli ölçüde deforme olmuş smektit piki, polimer matrisinde pul pul dökülmüş organokil levhacıkların varlığına ve nanokompozit oluşumuna atfedilmiştir. En düşük organokil içeriğine (MFKNK1) sahip nanokompozit köpüğün, pul pul dökülmüş organokil levhacıklarının lokalizasyonu nedeniyle nispeten daha zayıf bir yalıtım davranışı sergilediği ve bu nedenle düzgün bir polimerik ağ oluşturamadığı ve MFKNK2 de ısı yalıtım davranışında ciddi iyileşmeler olduğu ($\lambda = 0,0650 \text{ W/mK}$) belirlendi. Yüksek organokil içeriklerinde polimerik matriks içerisinde dağılmış organokil levhacıklarının artmasına bağlı olarak basınç dayanımı değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Nanokompozitler arasında en yüksek basınç dayanımı değeri, ağırlıkça %0,45 organokil içeren nanokompozit köpük (MFKNK3) için $0,68 \text{ N/mm}^2$ olarak belirlendi.

Bu çalışmada, yüksek reaksiyon hızı ve verimliliği ve kısa kürlenme süresi gibi avantajlar sunabilen, ısıtıl işlemle birleştirilmiş mikrodalga ısınlama tekniği kullanılarak melamin üre formaldehit organokil nanokompozit köpükler hazırlandı ve karakterize edildi.

Hazırlanan kompozitlerin organokil oranındaki artışa bağlı olarak basınç ve dayanım değerleri incelenmiştir. Saf MUF'a göre artan organokil oranı ile farklı miktarlarda organokil içeren kompozitlerin dokusal yapılarında daha önemli değişikliklerin meydana geldiği tespit edilmiştir. Düşük organokil içeren nanokompozitte (MUFKNK1), kısmi agregasyon sergilemelerine rağmen levhacıkların ağırlıklı olarak pul pul döküldüğü, ancak kompozitin dokusal yapısının hala saf MUF'unkine benzer olduğu gözlemlendi. Daha yüksek organokil oranlarına (MUFKNK2 ve 3) sahip kompozitlerde, organokil plakaları neredeyse tamamen pul pul dökülmüş ve bu da çok daha düzgün bir düzenlemeyle sonuçlanmıştır. Yüksek organokil oranlarıyla hazırlanan MUF nanokompozit köpüklerin yüzey morfolojileri, mikrokürelerin yoğun ve oldukça etkili tutarlı kümeler halinde bütünsel bir yapı oluşturduğunu gösterdi. En yüksek miktarda organokil içeren nanokompozit köpüğün (MUFKNK3) mikrokürelerinin daha yüksek yüzey alanına ve daha küçük boyutlara sahip olduğu, bunun sonucunda daha az bir topaklanma ve dolayısıyla daha düzgün ve bütünsel bir yapı elde edildiği belirlendi. İşlenmemiş MUF ve nano kompozitlerin XRD kırınım diyagramları karşılaştırıldığında, nano kompozit durumunda, MUF köpüğünün iki pikinden küçük olanının, $8,1^\circ$ 'deki karakteristik smektit zirvesiyle kısmen örtüştüğü görüldü. Bu sola kaymış veya önemli ölçüde deforme olmuş smektit piki, polimer matrisinde pul pul dökülmüş organokil levhacıkların varlığına ve nanokompozit oluşumuna atfedilmiştir. En düşük organokil içeriğine (MUFKNK1) sahip nanokompozit köpüğün, pul pul dökülmüş organokil levhacıklarının lokalizasyonu nedeniyle nispeten daha zayıf bir yalıtım davranışı sergilediği ve bu nedenle düzgün bir polimerik ağ oluşturamadığı ve MUFKNK2 ve MUFKNK3'de ise ısı yalıtım davranışında ciddi iyileşmeler olduğu belirlendi. Yüksek organokil içeriklerinde polimerik matriks içerisinde dağılmış organokil levhacıklarının artmasına bağlı olarak basınç dayanımı değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Nanokompozitler arasında en yüksek basınç dayanımı değeri, ağırlıkça %0,45 organokil içeren nanokompozit köpük (MUFKNK3) için $0,38 \text{ N/mm}^2$ olarak belirlendi.

Ayrıca yine bu çalışmada, yüksek reaksiyon hızı ve verimliliği ve kısa kürlenme süresi gibi avantajlar sunabilen, ısıl işleme birleştirilmiş mikrodalga ısınlama tekniği kullanılarak melamin anilin formaldehit organokil nanokompozit köpükler hazırlandı ve karakterize edildi. Hazırlanan kompozitlerin organokil oranındaki artışa bağlı olarak basınç ve dayanım değerleri incelenmiştir. Saf MAF'a göre artan organokil oranı ile farklı miktarlarda organokili içeren kompozitlerin dokusal yapılarında daha önemli değişikliklerin meydana geldiği tespit edilmiştir. Düşük organokil nanokompozitinde (MAFKNK1), kısmi agregasyon sergilemelerine rağmen levhacıkların ağırlıklı olarak pul pul döküldüğü, ancak kompozitin dokusal yapısının hala saf MAF'inkine benzer olduğu gözlemlendi. Organokil oranı arttıkça kil plakalarının pul pul dökülme miktarları artmıştır. Daha yüksek organokil oranlarına

(MAFKNK5 ve MAFKNK6) sahip kompozitlerde, organokil plakaları neredeyse tamamen pul pul dökülmüş ve bu da çok daha düzgün bir düzenlemeyle sonuçlanmıştır. Yüksek organokil oranlarıyla hazırlanan MAF nanokompozit köpüklerin yüzey morfolojileri, mikrokürelerin yoğun ve oldukça etkili tutarlı kümeler halinde bütünsel bir yapı oluşturduğunu gösterdi. En yüksek miktarda organo kil içeren nanokompozit köpüğün (MAFKNK6) mikrokürelerinin daha yüksek yüzey alanına ve daha küçük boyutlara sahip olduğu, bunun sonucunda daha az bir topaklanma ve dolayısıyla daha düzgün ve bütünsel bir yapı elde edildiği belirlendi. İşlenmemiş MAF ve nano kompozitlerin XRD kırınım diyagramları karşılaştırıldığında, nano kompozit durumunda, MAF köpüğünün iki zirvesinden küçük olanının, $8,1^\circ$ 'deki karakteristik smektit zirvesiyle kısmen örtüştüğü görüldü. Bu sola kaymış veya önemli ölçüde deforme olmuş smektit zirvesi, polimer matrisinde pul pul dökülmüş organokil levhacıkların varlığına ve nanokompozit oluşumuna atfedilmiştir. En düşük organokil içeriğine (MAFKNK1) sahip nanokompozit köpüğün, pul pul dökülmüş organokil levhacıklarının lokalizasyonu nedeniyle nispeten daha zayıf bir yalıtım davranışı sergilediği ve bu nedenle düzgün bir polimerik ağ oluşturamadığı ve MAFKNK2 ile ısı yalıtım davranışında bir miktar iyileşmeler olduğu ($\lambda = 0,051 \text{ W/m K}$) belirlendi. Yüksek organokil içeriklerinden bazılarında polimerik matriks içerisinde dağılmış organokil levhacıklarının artmasına bağlı olarak basınç dayanımı değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Nanokompozitler arasında en yüksek basınç dayanımı değeri, ağırlıkça %0,40 organokil içeren nanokompozit köpük (MAFKNK5) için $0,40 \text{ N/mm}^2$ olarak belirlendi.

Bu çalışmada, melamin formaldehit köpüğü, köpükendirme için yeni bir ajan ve küreme için mikrodalga radyasyonu ve ısı işlemlerin bir kombinasyonu kullanılarak başarıyla hazırlandı. Isı yalıtımı, mekanik dayanım, boyutsal stabilite ve kalıplama çevrim süresi açısından geliştirilmiş özelliklere sahip köpük bazlı hibrit kompozitler, nano dolgu maddesi olarak organo-montmorillonit, birincil dolgu maddesi olarak pomza alçı taşı, kaolin ve ikincil dolgu maddesi olarak içi boş bir cam küre gibi çeşitli malzemeler kullanılarak üretilmiştir. Spektroskopik ve mikroskobik analizler, polimer-kil nanokompozit parçacıkları ile dolgu taneleri arasında etkili yapışma etkileşimlerinin olduğunu ve bu nedenle farklı dokusal düzenlemelere ve üstün özelliklere sahip malzemelerin elde edilebileceğini göstermiştir. Isıl iletkenlik testi sonuçlarından melamin-formaldehit-organokil nano kompozit köpüğün (MFKNK) zayıf mekanik dayanımına rağmen çok iyi bir ısı yalıtım performansı ($\lambda: 0,0640 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) sergilediği belirlendi. Hazırlanan hibrit kompozitlerin bükülme mukavemeti sıralaması şu şekildedir: MF-organokil-pomza hibrit kompoziti (MFKPHK) > MF-organokil-kaolin hibrit kompozit (MFKPKHK) > MF-organokil-içi boş cam küre hibrit kompozit (MFKPCHK) > MF-organokil-pomza-alçı hibrit kompozit (MFKPAHK). Elastikiyet modülü

sırası şu şekildedir: MF-organokil-içi boş cam küre hibrit kompozit (MFKPCHK) > MF-organokil-pomza hibrit kompozit (MFKPHK) > MF-organokil-kaolin hibrit kompozit (MFKPKHC) > MF-organokil-pomza-alçı hibrit kompoziti (MFKPAHK). Öte yandan, vida tutma direnci sırası da MF-organokil-pomza taşı hibrit kompoziti (MFKPHK) = MF-organokil-içi boş cam küre hibrit kompozit (MFKPCHK) > MF-organokil -kaolin hibrit kompozit (MFKPKHK) > MF-organokil-pomza-alçı hibrit kompozit (MFKPAHK). Ayrıca, ısı yalıtım performansı sıralaması, MF-organokil nano kompozit (MFKNK) > MF-organokil- içi boş cam küre hibrit kompozit (MFKPCHK) > MF-organokil-pomza-alçı hibrit kompoziti (MFKPAHK) > melamin formaldehit köpük (MF) > MF-organokil-kaolin hibrit kompozit (MFKPKHK) > MF-organokil-pomza hibrit kompozit (MFKPHK) şeklindedir. İçi boş cam küreleri (MFKPCHK) içeren hibrit kompozitin, ısı yalıtımı ve mekanik dayanım açısından en yüksek performanslı malzeme olduğu belirlenmiştir (λ : 0,642 W/m K, kütle yoğunluğu: 0,36 g/cm³, dayanıklılık: 228,41 MPa, elastikiyet modülü: 2,22 MPa ve vida tutma direnci: 3,59 N/mm²).

KAYNAKLAR

- Abedi, S. and Abdouss, M., 2014. A review of clay-supported Ziegler–Natta catalysts for production of polyolefin/clay nanocomposites through in situ polymerization. *Applied Catalysis A: General*, 475, 386-409. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2014.01.028>
- Ábrányi, Á., Százdi, L., Pukánszky Jr, B., Vancsó, G. J. and Pukánszky, B., 2006. Formation and detection of clay network structure in poly (propylene)/layered silicate nanocomposites. *Macromolecular rapid communications*, 27(2), 132-135. Doi: 10.1002/marc.200500687
- Adesakin, A. O., Ajayi, O. O., Imosili, P. E., Attahdaniel, B. E. and Olusunle, S. O. O., 2013. Characterization and evaluation of mechanical properties of dolomite as filler in polyester. *Chemistry and Materials Research*, 3(8), 36-40.
- Agag, T., Geiger, S., Alhassan, S. M., Qutubuddin, S. and Ishida, H., 2010. Low-viscosity polyether-based main-chain benzoxazine polymers: precursors for flexible thermosetting polymers. *Macromolecules*, 43(17), 7122-7127. Doi: 10.1021/ma1014337
- Ahmed, A., Chaker, Y., Belarbi, E.H., Abbas, O., Chotard, J.N., Abassi, H.B., Van Nhien, A.N., El Hadri, M., Bresson, S., 2018. XRD and ATR/FT-IR investigations of various montmorillonite clays modified by monocationic and dicationic imidazolium ionic liquids. *Journal of Molecular Structure*, 1173, 653–664. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2018.07.039>
- Al-Ani, T. and Sarapää, O., 2008. *Clay and Clay Mineralogy. Physical-Chemical Properties and Industrial Uses*. GTK, 11-65 pp, Finland.
- Alateyah, A. I., Dhakal, H. N. and Zhang, Z. Y., 2013. Processing, properties, and applications of polymer nanocomposites based on layer silicates: a review. *Advances in Polymer Technology*, 32 (4), 21368. DOI 10.1002/adv.21368.
- Al-Bayati, R., 2015. Adsorption studies of Cr (VI) and Mn (II) in solution on a synthesized melamine formaldehyde supported Attapulgit clay. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 7 (1), 46-55. <http://jocpr.com/vol7-iss1-2015/JCPR-2015-7-1-46-55.pdf>
- Albozahid, M., Naji, H., Alobad, Z. and Saiani, A., 2022. The effect of OMMT reinforcement and annealing treatment on mechanical and thermal properties of Polyurethane Copolymer nanocomposites. *Journal of Elastomers & Plastics*, 54 (3), 477-493. <https://doi.org/10.1177/009524432110588>
- Alexandre, M. and Dubois, P., 2000. Polymer-layered silicate nanocomposites: preparation, properties and uses of a new class of materials. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 28(1-2), 1-63. [https://doi.org/10.1016/S0927-796X\(00\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S0927-796X(00)00012-7)
- Alič, B., Šebenik, U. and Krajnc, M., 2012. Microencapsulation of butyl stearate with melamineformaldehyde resin: Effect of decreasing the pH value on the composition and thermal stability of microcapsules. *Express Polymer Letters*, 6 (10), 826-836. Doi: 10.3144/expresspolymlett.2012.88

- Almuallim, B., Harun, W. S. W., Al Rikabi, I. J. and Mohammed, H. A., 2022. Thermally conductive polymer nanocomposites for filament-based additive manufacturing. *Journal of Materials Science*, 57(6), 3993-4019. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06820-2>
- Alsaadi, M. and Erklığ, A., 2019. Effects of clay and silica nanoparticles on the Charpy impact resistance of a carbon/aramid fiber reinforced epoxy composite. *Materials Testing*, 61(1), 65-70. <https://doi.org/10.3139/120.111283>
- Al-saedi, A.A., 2022. Clay basics and their physical and chemical properties. *IAETSD Journal For Advanced Research in Applied Sciences*, 10(8), 13-18.
- Alves, J.L., e Rosa, P.D.T.V. and Morales, A.R., 2016. A comparative study of different routes for the modification of montmorillonite with ammonium and phosphonium salts. *Applied Clay Science*, 132, 475-484. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.07.018>
- Amaral, C., Vicente, R., Ferreira, V.M., Silva, T., 2017. Polyurethane foams with microencapsulated phase change material: Comparative analysis of thermal conductivity characterization approaches. *Energy and Buildings*, 153, 392–402. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.019>
- Ambli, K.G., Dodamani, B.M., Jagadeesh, A. and Vanarotti, M. B., 2019. Heterogeneous composites for low and medium temperature thermal insulation: A review. *Energy and Buildings*, 199, 455-460. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.07.024>
- Ames, J. (1958). Silicones and their applications. *Journal of Scientific Instruments*, 35(1), 1.
- Annappa, A.R., Basavarajappa, S., Davim, J.P., 2022. Effect of organoclays on mechanical properties of glass fiber-reinforced epoxy nanocomposite. *Polymer Bulletin*, 79, 5085–5103. <https://doi.org/10.1007/s00289-021-03759-x>
- Anthony, J.W., Bideaux R.A., Bladh K.W., Nichols M.C., 2000. *Handbook of Mineralogy Volume IV*. Mineral Data Publishing, 680 p. Tucson.
- Aran, D., Maul, A., Masfaraud, J.F.A., 2008. Spectrophotometric measurement of soil cation exchange capacity based on cobaltihexamine chloride absorbance. *Sciences*, 340, 865-871. Doi: 10.1016/j.crte.2008.07.015.
- Aras, U., 2021. *Nano Katkı ve Vermikülit Kullanımının Yonga Levhaların Kalite Özelliklerine Etkisi*, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Arrabiyeh, P. A., May, D., Eckrich, M. and Dlugaj, A. M. (2021). An overview on current manufacturing technologies: Processing continuous rovings impregnated with thermoset resin. *Polymer Composites*, 42(11), 5630-5655. <https://doi.org/10.1002/pc.26274>
- Ashfaq, A., Clochard, M. C., Coqueret, X., Dispenza, C., Driscoll, M. S., Ulański, P. and Al-Sheikhly, M., 2020. Polymerization reactions and modifications of polymers by ionizing radiation. *Polymers*, 12(12), 2877. <https://doi.org/10.3390/polym12122877>
- ASTM 1037 16, 2007. Standard Test Method for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials. Annual Book of ASTM Standards. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D790, 2007. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. Annual Book of ASTM Standards. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.

- Awad, A. M., Shaikh, S. M., Jalab, R., Gulied, M. H., Nasser, M. S., Benamor, A. and Adham, S., 2019. Adsorption of organic pollutants by natural and modified clays: A comprehensive review. *Separation and Purification Technology*, 228, 115719. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115719>
- Azarpour, H., Moghadam, P. N., Ehsanimehr, S., and Vahabi, H., 2022. Novel electrically conductive nanocomposites based on polyaniline and poly (aniline-co-melamine) copolymers grafted on melamine–formaldehyde resin. *Iranian Polymer Journal*, 31(9), 1033-1045. <https://doi.org/10.1007/s13726-022-01055-7>
- Azeez, A. A., Rhee, K. Y., Park, S. J. and Hui, D., 2013. Epoxy clay nanocomposites—processing, properties and applications: A review. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 308-320. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.04.012>
- Bahadori, E., 2016. *Physico-Chemical properties of hybrid organic/inorganic nanotubes of imogolite type*. Ph.D. Dissertation, Politecnico di Torino, 183 p, Torino.
- Bajia, S., Sharma, R. and Bajia, B., 2009. Solid-state microwave synthesis of melamine-formaldehyde resin. *Journal of Chemistry*, 6, 120-124.
- Balta, J. A., Simpson, J., Michaud, V., Månson, J. A. and Schrooten, J., 2001. Embedded shape memory alloys confer aerodynamic profile adaptivity. *Smart Materials Bulletin*, (12), 8-12.
- Balucan, R. D., 2012. *Thermal studies of magnesium silicates from the great serpentinite belt in New South Wales for CO₂ sequestration by mineral carbonation in Australia*. Ph. D. Dissertation, Australia The University of Newcastle.
- Barton, C. D. and Karathanasis, A. D., 2002. *Clay Minerals: Encyclopedia of Soil Science*. Rattan Lal, comp., ed. Marcel Dekker: New York, USA, 187-192.
- Baysal, G., Aydın, H., Uzan, S. and Hoşgören, H., 2018. Investigation of antimicrobial properties of QASs⁺(novel synthesis). *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 12, 695-700.
- Beaufort, D., Rigault, C., Billon, S., Billault, V., Inoue, A., Inoué, S. and Patrier, P., 2015. Chlorite and chloritization processes through mixed-layer mineral series in low-temperature geological systems—a review. *Clay Minerals*, 50 (4), 497-523. Doi: 10.1180/claymin.2015.050.4.06
- Becker, C., Krug, H. and Schmidt, H., 1996. Tailoring of thermomechanical properties of thermoplastic nanocomposites by surface modification of nanoscale silica particles. *MRS Online Proceedings Library (OPL)*, 435, 237.
- Bergaya, F. and Vayer, M., 1997. CEC of clays: measurement by adsorption of a copper ethylenediamine complex. *Applied clay science*, 12(3), 275-280.
- Bergaya, F. B. K. G. and Lagaly, G., 2013. General introduction: clays, clay minerals, and clay science. In *Developments in Clay Science*, Vol. 5, 1-19. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098258-8.00001-8>
- Bergaya, F., Jaber, M. and Lambert, J. F., 2011. Clays and clay minerals. *Rubber-Clay Nanocomposites: Science, Technology, and Applications*, 1-44.
- Bergaya, F., Lagaly, G. and Vayer, M., 2006. Cation and anion exchange. *Developments in clay science*, 1, 979-1001. [https://doi.org/10.1016/S1572-4352\(05\)01036-6](https://doi.org/10.1016/S1572-4352(05)01036-6)
- Bernet, N., Wakeman, M. D., Bourban, P. E. and Månson, J. A., 2002. An integrated cost and consolidation model for commingled yarn based composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33(4), 495-506. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(01\)00140-3](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(01)00140-3)

- Billmeyer, F.W., 1984. *Textbook of Polymer Science*, 3rd Edn, Wiley, New York.
- Biron, M., 2004. *Thermosets and Composites*. Elsevier, New York, NY, USA, <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-411-4.X5000-1>.
- Bittmann, B., Hauptert, F. and Schlarb, A. K., 2009. Ultrasonic dispersion of inorganic nanoparticles in epoxy resin. *Ultrasonics Sonochemistry*, 16(5), 622-628. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2009.01.006>
- Bolto, B., Dixon, D., Eldridge, R. O. B. and King, S., 2001. Cationic polymer and clay or metal oxide combinations for natural organic matter removal. *Water Research*, 35 (11), 2669-2676. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00552-2](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00552-2)
- Bonazzi, P., Lampronti, G. I., Bindl, L. and Zanardi, S., 2005. Wakabayashilite, [(As, Sb)₆S₉] [As₄S₅]: Crystal structure, pseudosymmetry, twinning, and revised chemical formula. *American Mineralogist*, 90(7), 1108-1114. Doi: 10.2138/am.2005.1809
- Bono, A., Yeo, K.B. and Siambun, N.J., 2003. Melamine–urea–formaldehyde (MUF) resin: the effect of the number of reaction stages and mole ratio on resin properties. *Jurnal Teknologi*, 38(F), 43-52.
- Boon, Z. H., Teo, Y. Y. and Ang, D. T. C., 2022. Recent development of biodegradable synthetic rubbers and bio-based rubbers using sustainable materials from biological sources. *RSC Advances*, 12(52), 34028-34052. Doi: 10.1039/D2RA06602E
- Borcea, L. and Bruno, O., 2001. On the Magneto-elastic Properties of elastomer-ferromagnet composites, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 49(12), 2877–2991. [https://doi.org/10.1016/S0022-5096\(01\)00108-9](https://doi.org/10.1016/S0022-5096(01)00108-9)
- Braunecker, W. A. and Matyjaszewski, K., 2007. Controlled/living radical polymerization: Features, developments, and perspectives. *Progress in Polymer Science*, 32 (1), 93-146. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2006.11.002>
- Brigatti, M. F., Galan, E. and Theng, B. K. G. 2006. Structures and mineralogy of clay minerals. *Developments in clay science*, 1, 19-86. [https://doi.org/10.1016/S1572-4352\(05\)01002-0](https://doi.org/10.1016/S1572-4352(05)01002-0)
- Brown, G. and Brindley, G.W., 1980. X-ray diffraction procedures for clay mineral identification. In: Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification, G.W. Brindley and G. Brown (eds.), *Mineralogical Society*, London, 305-360.
- Burrafato, G. and Miano, F., 1993. Determination of the cation exchange capacity of clays by surface tension measurement. *Clay Minerals*, 28, 475-481. Doi: <https://doi.org/10.1180/claymin.1993.028.3.10>.
- Buruga, K., Song, H., Shang, J., Bolan, N., Jagannathan, T. K. and Kim, K. H., 2019. A review on functional polymer-clay based nanocomposite membranes for treatment of water. *Journal of Hazardous Materials*, 5(379), 120584. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.04.067>
- Cai, X., 2007. *Wood modifications for valued-added applications using nanotechnology-based approaches*. Ph. D. Dissertaion, Département Des Sciences Du Bois Et De La Forêt Faculté De Foresterie Et De Géomatique Université Laval Québec, France.
- Cai, X., Riedl, B., Zhang, S. Y. and Wan, H., 2007. Formation and properties of nanocomposites made up from solid aspen wood, melamine-urea-formaldehyde, and clay. *Journal Holzforschung*, <https://doi.org/10.1515/HF.2007.027>
- Carothers, W. H., 1936. Polymers and polyfunctionality. *Transactions of the Faraday Society*, 32, 39-49.

- Chabra R, Pleysier J, Cremers A., 1975. The measurement of the cation exchange capacity and exchangeable cations in soils: A new method. *Proceedings of the International Clay Conference*, 439-449.
- Chen, B., 2004. Polymer–clay nanocomposites: an overview with emphasis on interaction mechanisms. *British Ceramic Transactions*, 103(6), 241-249. DOI 10.1179/096797804X4592
- Chen, G., Wu, C., Weng, W., Wu, D., Yan, W., 2003. Preparation of polystyrene/graphite nanosheet composites. *Polymer*, 44, 1781. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(03\)00050-8](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(03)00050-8)
- Chen, J., Lekawa-Raus, A., Trevarthen, J., Gizewski, T., Lukawski, D., Hazra, K., Rahatekar, S.S., Koziol, K.K., 2020. Carbon nanotube films spun from a gas phase reactor for manufacturing carbon nanotube film/carbon fibre epoxy hybrid composites for electrical applications. *Carbon*, 158, 282–290. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.08.078>
- Chen, L. W., 2009. *Extrudable melamine resin for wood plastic composites*, Ph. D. Dissertation, Washington State University.
- Chen, Z., Wang, J., Yu, F., Zhang, Z. and Gao, X., 2015. Preparation and properties of graphene oxide-modified poly (melamine-formaldehyde) microcapsules containing phase change material n-dodecanol for thermal energy storage. *Journal of Materials Chemistry A*, 3(21), 11624-11630.
- Childs, C. W., Parfitt, R. L. and Newman, R. H., 1990. Structural studies of Silica Springs allophane. *Clay Minerals*, 25 (3), 329-341.
- Ciardelli, F., Bertoldo, M., Bronco, S. and Passaglia, E., 2019. *Polymers from Fossil and Renewable Resources*. Springer International Publishing, Cham.
- Clifford, S., Jansson, N., Yu, W., Michaud, V., and Månson, J. A., 2006. Thermoviscoelastic anisotropic analysis of process induced residual stresses and dimensional stability in real polymer matrix composite components. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(4), 538-545. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.05.008>
- Coessens, V., Pintauer, T. and Matyjaszewski, K., 2001. Functional polymers by atom transfer radical polymerization. *Progress in Polymer Science*, 26(3), 337-377. [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(01\)00003-X](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(01)00003-X)
- Cohen, R., Yariv, S., 1984. Metachromasy in clay minerals. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transaction*. 86. Doi: <https://doi.org/10.1039/F19848001705>
- Dabrowski, F., Bourbigot, S., Delobel, R. and Le Bras, M., 2000. Kinetic modelling of the thermal degradation: Of polyamide-6 nanocomposite. *European Polymer Journal*, 36(2), 273-284. [https://doi.org/10.1016/S0014-3057\(99\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0014-3057(99)00079-8)
- Dahman, Y., 2017. *Nanotechnology and Functional Materials for Engineers*, Elsevier, Oxford, Canada.
- Das, A., Chatham, C. A., Fallon, J. J., Zawaski, C. E., Gilmer, E. L., Williams, C. B. and Bortner, M. J. 2020. Current understanding and challenges in high temperature additive manufacturing of engineering thermoplastic polymers. *Additive Manufacturing*, 34, 101218. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101218>
- Das, P. P., Chaudhary, V., Ahmad, F. and Manral, A., 2021. Effect of nanotoxicity and enhancement in performance of polymer composites using nanofillers: A state-of-the-art review. *Polymer Composites*, 42(5), 2152-2170. Doi: 10.1002/pc.25968

- Das, P., Manna, S., Behera, A. K., Shee, M., Basak, P. and Sharma, A. K., 2022. Current synthesis and characterization techniques for clay-based polymer nano-composites and its biomedical applications: A review. *Environmental Research*, 212, 113534. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113534>
- de Oliveira, A. D. and Beatrice, C. A. G., 2018. Polymer nanocomposites with different types of nanofiller. *Nanocomposites-Recent Evolutions*, Subbarayan Sivasankaran (Ed.). Publish with Intech Open, London, 103-104. Doi: 10.5772/intechopen.81329
- De Paiva, L. B., Morales, A. R., Diaz, F. R. V., 2008. Organoclays: Properties, Preparation and Applications. *Applied Clay Science*, 42, 8–24. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2008.02.006>
- Dennis, H., Hunter, D. L., Chang, D., Kim, S., White, J. L., Cho, J. W. and Paul, D. R., 2001. Effect of melt processing conditions on the extent of exfoliation in organoclay-based nanocomposites. *Polymer*, 42(23), 9513-9522. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(01\)00473-6](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(01)00473-6)
- Desidery, L. and Lanotte, M., 2022. Polymers and plastics: Types, properties, and manufacturing. In *Plastic waste for sustainable asphalt roads* (pp. 3-28). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85789-5.00001-0>
- Despres, A., Pizzi, A., 2006. Colloidal aggregation of aminoplastic polycondensation resins: Urea–formaldehyde versus melamine–formaldehyde and melamine–urea–formaldehyde resins. *Journal of Applied Polymer Science*, 100(2), 1406-1412.
- Devallencourt, C., Saiter, J. M. and Capitaine, D., 2000. Reactions between melamine formaldehyde resin and cellulose: Influence of pH. *Journal of Applied Polymer Science*, 78 (11), 1884-1896.
- Dharkar, K. P., Khamborkar, A. K., and Kalambe, A. B., 2012. Thermal Degradation Analysis of Melamine-Aniline-Formaldehyde Terpolymeric Ligand. *Research Journal of Chemical Sciences*. 2(12), 11-16.
- Ding, Z., Ding, Z., Zhang, D. and Chao, C., 2022. The hydrolytic stability and structure of the cured melamine-urea-formaldehyde resin. *The Journal of Adhesion*, 98 (11), 1614-1634. Doi: 10.1080/00218464.2021.1930536
- do Nascimento, G. M., 2021. Introductory Chapter: Polymers and Clays-A Fruitful Combination. *Clay and Clay Minerals*, Gustavo Morari Do Nascimento (Ed.), Publish with Intech Open, London, 3-12.
- Dogan, A., Arikan, V., 2017. Low-velocity impact response of E-glass reinforced thermoset and thermoplastic based sandwich composites. *Composites Part B: Engineering*, 127, 63–69. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.06.027>
- Doh, J. G., and Cho, I., 1998. Synthesis and properties of polystyrene-organoammonium montmorillonite hybrid. *Polymer Bulletin*, 41, 511-518.
- Dorieh, A., Pour, M. F., Movahed, S. G., Pizzi, A., Selakjani, P. P., Kiamahalleh, M. V., Hatefnia, H., Shahavi, M., H., Aghaei, R., 2022. A review of recent progress in melamine-formaldehyde resin-based nanocomposites as coating materials. *Progress in Organic Coatings*, 165, 106768. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.106768>
- Dorieh, A., Selakjani, P. P., Shahavi, M. H., Pizzi, A., Movahed, S. G., Pour, M. F. and Aghaei, R. 2022. Recent developments in the performance of micro/nanoparticle-modified urea-formaldehyde resins used as wood-based composite binders: A review. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 114, 103106. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2022.103106>

- Erbs, A., Nagalli, A., de Carvalho, K. Q., Mymrin, V., Passig, F. H. and Mazer, W., 2018. Properties of recycled gypsum from gypsum plasterboards and commercial gypsum throughout recycling cycles. *Journal of Cleaner Production*, 183, 1314-1322. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.189>
- Fakirov, S. 2017. *Fundamentals of polymer science for engineers*. John Wiley and Sons.
- Flory, P. J., 1941. Molecular size distribution in three dimensional polymers. I. Gelation1. *Journal of the American Chemical Society*, 63 (11), 3083-3090.
- Flory, P. J., 1946. Fundamental principles of condensation polymerization. *Chemical Reviews*, 39 (1), 137-197.
- Fornes, T. D., Yoon, P. J., Keskkula, H. and Paul, D. R., 2001. Nylon 6 nanocomposites: the effect of matrix molecular weight. *Polymer*, 42(25), 09929-09940. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(01\)00552-3](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(01)00552-3)
- Frihart, C.R., 2013. Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites, *Wood Adhesion and Adhesives*, R. Rowell editor, Second Edition, 255-321, Taylor and Francis, CRC Press, Boca Raton, FL, USA. <https://doi.org/10.1201/9780203492437>
- Frontini, P. M., and Pouzada, A. S., 2015. Trends in the multifunctional performance of polyolefin/clay nanocomposite injection moldings. *Multifunctionality of Polymer Composites. Challenges and New Solutions*, 213-245.
- Fu, S., Sun, Z., Huang, P., Li, Y. and Hu, N., 2019. Some basic aspects of polymer nanocomposites: A critical review. *Nano Materials Science*, 1(1), 2-30. <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2019.02.006>
- Galamboš, M., Suchánek, P. and Rosskopfová, O., 2012. Sorption of anthropogenic radionuclides on natural and synthetic inorganic sorbents. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 293 (2), 613-633. DOI 10.1007/s10967-012-1717-y
- Gao, F., 2004. Clay/polymer composites: the story. *Materials Today*, 7(11), 50-55. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(04\)00509-7](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(04)00509-7)
- Gao, Y., Liu, S., Wang, Q., and Wang, G., 2020. Preparation of melamine–formaldehyde resin grafted by (3-aminopropyl) triethoxysilane for high-performance hydrophobic materials. *Journal of Applied Polymer Science*, 137(19), 48664. DOI: 10.1002/app.48664
- Gardolinski, J. E. F. C., and Lagaly, G., 2005. Grafted organic derivatives of kaolinite: II. Intercalation of primary n-alkylamines and delamination. *Clay Minerals*, 40(4), 547-556.
- George, A., Sanjay, M. R., Srisuk, R., Parameswaranpillai, J. and Siengchin, S., 2020. A comprehensive review on chemical properties and applications of biopolymers and their composites. *International Journal of Biological Macromolecules*, 154, 329-338. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.03.120>
- Ghosh, S. K., 1997. Clay research in India. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 45(4), 637-658.
- Giannelis, E. P., 1996. Polymer layered silicate nanocomposites. *Advanced Materials*, 8(1), 29-35.
- Giannelis, E. P., Krishnamoorti, R., and Manias, E., 1999. Polymer-silicate nanocomposites: model systems for confined polymers and polymer brushes. *Polymers in Confined Environments*, 138, 107-147.

- Giese, B., 1986. *Radicals in organic synthesis: formation of carbonecarbon bonds*. Oxford: Pergamon Press.
- Gilman, J. W., 1999. Flammability and thermal stability studies of polymer layered-silicate (clay) nanocomposites. *Applied Clay Science*, 15(1-2), 31-49.
- Gindl, W., and Jeronimidis, G., 2004. Wood pulp fiber reinforced melamine-formaldehyde composites. *Journal of Materials Science*, 39(9), 3245-3247.
- Gindl, W., Zargar-Yaghubi, F. and Wimmer, R., 2003. Impregnation of softwood cell walls with melamine-formaldehyde resin. *Bioresource Technology*, 87(3), 325-330. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00233-X](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00233-X)
- Girods, P., Dufour, A., Rogaume, Y., Rogaume, C., and Zoulalian, A., 2008. Thermal removal of nitrogen species from wood waste containing urea formaldehyde and melamine formaldehyde resins. *Journal of Hazardous Materials*, 159(2-3), 210-221. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.02.003>
- Gomes, C. S. and Rautureau, M., 2021. General Data on Clay Science, Crystallochemistry and Systematics of Clay Minerals, Clay Typologies, and Clay Properties and Applications. In *Minerals latu sensu and Human Health: Benefits, Toxicity and Pathologies* (pp. 195-269). Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-65706-2>
- Gómez-Romero, P., and Sanchez, C., 2005. Hybrid materials. Functional properties. From Maya Blue to 21st century materials. *New Journal of Chemistry*, 29(1), 57-58.
- Guégan, R., 2019. Organoclay applications and limits in the environment. *Comptes Rendus Chimie*, 22(2-3), 132-141. Doi: 10.1016/j.crci.2018.09.004
- Guggenheim, S. and Martin, R. T., 1995. Definition of clay and clay mineral: joint report of the AIPEA nomenclature and CMS nomenclature committees. *Clays and Clay Minerals*, 43 (2), 255-256.
- Guler, U. A., and Sarioglu, M., 2014. Removal of tetracycline from wastewater using pumice stone: equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 12, 1-11. <http://www.ijehse.com/content/12/1/79>
- Gümüş, G., 2001. *Siyanür tayini için yeni bir spektrofotometrik yöntem*, Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Gunal, H., Ransom, M.D., 2006. Clay mineralogy, specific surface area and micromorphology of polygenetic soils from eastern Kansas. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 51, 459-468. Doi: <https://doi.org/10.1080/03650340500186439>
- Günister Canbaz, E., 2008. *Synthesis and characterization of biopolymer/clay nanocomposites*. Ph.D. Thesis, Institute of Natural Sciences, Istanbul Technical University, Sarıyer, Turkey.
- Günister, E., 2004. *Na-Aktif Bentonit-Su Sisteminde Partikül Etkileşimleri Üzerine BDTDACI ve DTABr Katyonik Yüzey Aktiflerinin Etkisinin Reolojik ve Elektrokinetik Yöntemlerle İncelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Guo, F., Aryana, S., Han, Y. and Jiao, Y., 2018. A review of the synthesis and applications of polymer–nanoclay composites. *Applied Sciences*, 8(9), 1696. <https://doi.org/10.3390/app8091696>
- Guo, L., Wang, F. and Li, H. 2022. Preparation and characterization of cellulose nanofiber/melamine–urea–formaldehyde composite aerogels for thermal insulation applications. *Polymer Composites*, 43 (11), 7882-7892. Doi: 10.1002/pc.26910

- Gürses, A. and Şahin, E. 2023. Preparation of melamine formaldehyde foam and a melamine-formaldehyde-organo-clay nanocomposite and hybrid composites. *Minerals*, 13(11), 2-20. <https://doi.org/10.3390/min13111407>
- Gürses, A. and Şahin, E., 2024. Preparation of melamine urea formaldehyde organo clay nanocomposite foams using thermal processing and microwave irradiation techniques and investigation of their thermal insulation and compressive strength. *Polymer Science, Series B*, 1-12.
- Gürses, A., 2015. *Introduction to polymer–clay nanocomposites*, Taylor and Francis: USA.
- Gürses, A., Barın, T.B., 2023. Preparation, structural characterization and evaluation of some dynamic and rheological properties of a new type of clay containing mastic material, clay-mastic. *Minerals*, 13, 2-16. <https://doi.org/10.3390/min13050705>
- Gürses, A., Doğar, Ç., Köktepe, S., Mindivan, F., Güneş, K., and Aktürk, S. 2015. Investigation of thermal properties of PUF/colored organoclay nanocomposites. *Acta Physica Polonica A*, 127(4), 979-983.
- Gürses, A., Ejder-Korucu, M., Karaca, S., 2011. Clay-Organoclay and Organoclay/Polymer Nanocomposites. In: *Clay: Types, Properties and Uses*, Chapter 4 Justin P. Humphrey and Daniel E. Boyd. Nova Science Publishers, Inc., Hauppauge, United States of America, 155-192.
- Gürses, A., Eroğlu, Z., Güneş, K., and Doğar, Ç., 2016. Synthesis and thermal and textural characterization of aniline formaldehyde-organoclay composites. *Acta Physica Polonica A*, 129(4), 853-856.
- Gürses, A., Güneş, K., Şahin, E., and Açıkyıldız, M., 2023. Investigation of the removal kinetics, thermodynamics and adsorption mechanism of anionic textile dye, Remazol Red RB, with powder pumice, a sustainable adsorbent from waste water. *Frontiers in Chemistry*, 11, 11-14, DOI: 10.3389/fchem.2023.1156577
- Guynnet, D., Gaucher, E., Gaboriau, H., Pons, C.H., Clinard, C., Norotte, V., Didier, G., 2005. Geosynthetic clay liner interaction with leachate: Correlation between permeability, microstructure, and surface chemistry. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131, 740. Doi:10.1061/ (ASCE)1090-0241 (2005)131:6 (740)
- Han, S., Chen, Y., Lyu, S., Chen, Z., Wang, S. and Fu, F., 2020. Effects of processing conditions on the properties of paraffin/melamine-urea-formaldehyde microcapsules prepared by in situ polymerization. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 585, 124046. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.124046>
- Han, S., Lyu, S., Wang, S. and Fu, F., 2019. High-intensity ultrasound assisted manufacturing of melamine-urea-formaldehyde/paraffin nanocapsules. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 568, 75-83. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.01.054>
- Haraguchi, K. and Li, H. J., 2006. Mechanical properties and structure of polymer– clay nanocomposite gels with high clay content. *Macromolecules*, 39(5), 1898-1905.
- Hayes, R., Imberti, S., Warr, G. G. and Atkin, R., 2014. Effect of cation alkyl chain length and anion type on protic ionic liquid nanostructure. *The Journal of Physical Chemistry C*, 118 (25), 13998-14008. [dx.doi.org/10.1021/jp503429k](https://doi.org/10.1021/jp503429k)
- Hazarika, A. and Maji, T. K., 2014. Modification of softwood by monomers and nanofillers. *Defence Science Journal*, 64 (3), 262-272. Doi: 10.14429/dsj.64.7325

- He, W., Li, B., Meng, X., Shen, Q., 2023. Compound Effects of sodium chloride and gypsum on the compressive strength and sulfate resistance of slag-based geopolymer concrete. *Buildings*, 13(3), 675. <https://doi.org/10.3390/buildings13030675>
- Heinz, H., 2012. Clay minerals for nanocomposites and biotechnology: surface modification, dynamics and responses to stimuli. *Clay Minerals*, 47(2), 205-230. Doi: 10.1180/claymin.2012.047.2.05
- Hirano, K. and Asami, M., 2013. Phenolic resins—100 years of progress and their future. *Reactive and Functional Polymers*, 73(2), 256-269.
- Hong, H., Churchman, G. J., Gu, Y., Yin, K. and Wang, C., 2012. Kaolinite–smectite mixed-layer clays in the Jiujiang red soils and their climate significance. *Geoderma*, 173, 75-83. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.12.006>
- Hopewell, J., Dvorak, R., and Kosior, E., 2009. Plastics recycling: challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2115-2126. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0311>
- Hopwood, F. L. and Phillips, J. T., 1939. Polymerization of liquids by irradiation with neutrons and other rays. *Nature*, 143(3624), 640-640.
- Hossain, M. S. and Ahmed, S., 2022. Synthesis of nano-crystallite gypsum and bassanite from waste *Pila globosa* shells: crystallographic characterization. *RSC Advances*, 12(38), 25096-25105. Doi: 10.1039/D2RA04881G
- Hosseiniabadi, H. G., Khederlou, K., Payandehpeyman, J. and Bagheri, R., 2016. On variations of the interphase thickness and the slope of strengthening by clay addition in exfoliated polymer-clay nanocomposites. *Polymer*, 90, 302-308. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2016.03.021>
- Hou, S. S. and Schmidt-Rohr, K., 2003. Polymer– Clay Nanocomposites from Directly Micellized Polymer/Toluene in Water and Their Characterization by WAXD and Solid-State NMR Spectroscopy. *Chemistry of Materials*, 15(10), 1938-1940.
- Houphouët-Boigny, C., Plummer, C. J., Wakeman, M. D. and Manson, J. A. E., 2008. Hybrid glass fiber-reinforced thermoplastic nanocomposites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 21(1), 103-118. Doi: 10.1177/0892705707084545
- Hsieh, A. J., Song, J. W., Nebo, J. and Singh, A., 2001. Ballistic impact measurements of polycarbonate layered-silicate nanocomposites. In *ANTEC 2001 Conference Proceedings*, Dallas (p. 5).
- Hsieh, T.H., Kinloch, A.J., Masania, K., Taylor, A.C., 2021. Sprenger, S. The mechanisms and mechanics of the toughening of epoxy polymers modified with silica nanoparticles. *Polymer*, 51, 6284–6294. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2010.10.048>
- Hsissou, R., Seghiri, R., Benzekri, Z., Hilali, M., Rafik, M., and Elharfi, A., 2021. Polymer composite materials: A comprehensive review. *Composite Structures*, 262, 113640. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113640>
- Huang, J. S., and Gibson, L. J., 1993. Elastic moduli of a composite of hollow spheres in a matrix. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 41(1), 55-75. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(93\)90063-L](https://doi.org/10.1016/0022-5096(93)90063-L)
- Hussain, F., Hojjati, M., Okamoto, M., and Gorga, R. E., 2006. Polymer-matrix nanocomposites, processing, manufacturing, and application: an overview. *Journal of Composite Materials*, 40(17), 1511-1575. <https://doi.org/10.1177/002199830606732>

- Idol, J. D. and Lehman, R. L., 2004. *Polymers*. The CRC Handbook of Mechanical Engineering. Editörler: Frank Kreith ve Yogi Goswami, CRC Press, Newyork. <https://doi.org/10.1201/9781420041583>
- Idumah, C. I., and Obele, C. M., 2021. Understanding interfacial influence on properties of polymer nanocomposites. *Surfaces and Interfaces*, 22, 100879. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100879>
- Ifijen, I. H., Maliki, M., Odiachi, I. J., Aghedo, O. N. and Ohiocheoya, E. B. (2022). Review on solvents-based alkyd resins and water borne alkyd resins: impacts of modification on their coating properties. *Chemistry Africa*, 5(2), 211-225.
- İşçi, S., 2007. *Kil/PVA ve organokil/PVA nanokompozitlerinin sentezi ve karakterizasyonu*. (Doktora Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ishak, N., 2012. *Formulation of melamine urea formaldehyde (MUF) resin by using various types of filler*. Doctoral dissertation, UMP.
- Islam, S. and Bhat, G., 2021. Progress and challenges in self-healing composite materials. *Materials Advances*, 2(6), 1896-1926. Doi: 10.1039/D0MA00873G
- Ismadji, S., Soetaredjo, F. E., Ayucitra, A., Ismadji, S., Soetaredjo, F. E. and Ayucitra, A., 2015. Modification of clay minerals for adsorption purpose. *Clay Materials for Environmental Remediation*, 39-56.
- Ivanov, V.S. 1992. *Radiation chemistry of polymers*. VSP: Utrecht, The Netherlands.
- Ivanova, N. M., Visurkhanova, Y. A. and Soboleva, E. A., 2018. Structure and electrocatalytic properties of copper-containing aniline–melamine–formaldehyde polymer composites. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 91(3), 396-403.
- Jansson, N., Wakeman, W. D., and Månson, J. A., 2007. Optimization of hybrid thermoplastic composite structures using surrogate models and genetic algorithms. *Composite Structures*, 80(1), 21-31. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2006.02.036>
- Jasmani, L., Rusli, R., Khadiran, T., Jalil, R. and Adnan, S., 2020. Application of nanotechnology in wood-based products industry: A review. *Nanoscale Research Letters*, 15, 1-31. <https://doi.org/10.1186/s11671-020-03438-2>
- Jawaid, M. H. P. S. and Khalil, H. A., 2011. Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: A review. *Carbohydrate Polymers*, 86(1), 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.04.043>
- Jeute, T., Baker, L. L., Bishop, J. L., Abidin, Z. and Rampe, E. B., 2021. Spectroscopic analysis of allophane and imogolite samples with variable Fe abundance for characterizing the poorly crystalline components on Mars. *American Mineralogist*, 106 (4), 527-540.
- Ji, L. N., 2013. Study on preparation process and properties of polyethylene terephthalate (PET). *Applied mechanics and materials*, 312, 406-410. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.312.406>
- Jia, C., Zhu, G., Legg, B. A., Guan, B. and De Yoreo, J. J., 2022. Bassanite Grows Along Distinct Coexisting Pathways and Provides a Low Energy Interface for Gypsum Nucleation. *Crystal Growth & Design*, 22(11), 6582-6587. doi.org/10.1021/acs.cgd.2c00794
- Jia, X., Wang, J., Hou, C., Tan, Y. and Zhang, Y., 2018. Effective insensitiveness of melamine urea-formaldehyde resin via interfacial polymerization on nitramine explosives. *Nanoscale Research Letters*, 13, 1-12. <https://doi.org/10.1186/s11671-018-2803-z>

- Jiang, W., Chen, H. S., Chen, Y., 2006. Nanocomposites from phenolic resin and various organo-modified montmorillonites: preparation and thermal stability. *Journal of Applied Polymer Science*, 102, 5336–5343. DOI 10.1002/app.24893
- Jiun, Y. L., Tze, C. T., Moosa, U. and Tawawneh, M. A. A., 2016. Effects of recycling cycle on used thermoplastic polymer and thermoplastic elastomer polymer. *Polymers and Polymer Composites*, 24(9), 735-740.
- Jokar, M., Abdul Rahman, R., Ibrahim, N. A., Abdullah, L. C. and Tan, C. P., 2012. Melt production and antimicrobial efficiency of low-density polyethylene (LDPE)-silver nanocomposite film. *Food and Bioprocess Technology*, 5, 719-728.
- Jorda, J., Kain, G., Barbu, M.C., Petutschnigg, A., Král, P., 2021. Influence of adhesive systems on the mechanical and physical properties of flax fiber reinforced beech plywood. *Polymers*, 13, 3086. <https://doi.org/10.3390/polym13183086>
- Jordan, J., Jacob, K. I., Tannenbaum, R., Sharaf, M. A. and Jasiuk, I. 2005. Experimental trends in polymer nanocomposites—a review. *Materials Science and Engineering: A*, 393(1-2), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.09.044>
- Judah, H., 2019. *The synthesis, characterisation and rheological properties of clay-polymer nanocomposites*. Sheffield Hallam University (United Kingdom).
- Jumahat, A., Soutis, C., Mahmud, J. and Ahmad, N., 2012. Compressive properties of nanoclay/epoxy nanocomposites. *Procedia Engineering*, 41, 1607-1613. Doi: 10.1016/j.proeng.2012.07.357
- Kandelbauer, A., Petek, P., Medved, S., Pizzi, A., and Teischinger, A., 2010. On the performance of a melamine–urea–formaldehyde resin for decorative paper coatings. *European Journal of Wood and Wood Products*, 68(1), 63-75. DOI 10.1007/s00107-009-0352-y
- Karakaya, C., Gündüz, G., Aras, L. and Mecidoğlu, İ. A., 2007. Synthesis of oil based hyperbranched resins and their modification with melamine-formaldehyde resin. *Progress in Organic Coatings*, 59(4), 265-273. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2007.03.004>
- Kargarzadeh, H., Mariano, M., Huang, J., Lin, N., Ahmad, I., Dufresne, A. and Thomas, S., 2017. Recent developments on nanocellulose reinforced polymer nanocomposites: A review. *Polymer*, 132, 368-393. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2017.09.043>
- Karpinski, B., Szkodo M., Clay minerals – Mineralogy and phenomenon of clay swelling in oli and gas industry. *Advanced in Material Science*, 15, 37-55. Doi: <https://doi.org/10.1515/adms-2015-0006>
- Keledi, G., Hári, J. and Pukánszky, B., 2012. Polymer nanocomposites: structure, interaction, and functionality. *Nanoscale*, 4 (6), 1919-1938.
- Kelsall, R.W., Hamley, I.W. ve Geoghegan, M., 2005. Nanoscale science and technology, Wiley Online Library, New Jersey, 76.
- Khorzughy, S. H., Eslamkish, T., Ardejani, F. D. and Heydartaemeh, M. R., 2015. Cadmium removal from aqueous solutions by pumice and nano-pumice. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 32, 88-96. Doi: 10.1007/s11814-014-0168-2
- Kiliaris, P., Papaspyrides, C.D., 2010. Polymer/layered silicate (clay) nanocomposites: An overview of flame retardancy. *Progress in Polymer Science*, 35, 902–958. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2010.03.001>
- Kohut, C. K. and Warren, C. J., 2002. Chlorites. *Soil Mineralogy with Environmental Applications*, 7, 531-553. <https://doi.org/10.2136/sssabookser7.c17>

- Koizumi, K., Charles, T. and De Keyser, H., 2010. *Phenolic molding compounds*. Phenolic resins: a century of progress, 383-437, Springer.
- Koji, W. (1989). Allophane and imogolite. *Minerals in Soil Environments*, 1, 1051-1087. <https://doi.org/10.2136/sssabookser1.2ed.c21>
- Kojima, Y., Usuki, A., Kawasumi, M., Okada, A., Kurauchi, T. and Kamigaito, O., 1993. Synthesis of nylon 6–clay hybrid by montmorillonite intercalated with ϵ -caprolactam. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 31(4), 983-986.
- Kolek, Z., 2001. Recycled polymers from food packaging in relation to environmental protection. *Polish Journal of Environmental Studies*, 10(1), 73-76.
- Konn, C., Morel, F., Beyou, E., Chaumont, P. and Bourgeat-Lami, E., 2007. Nitroxide-mediated polymerization of styrene initiated from the surface of laponite clay platelets. *Macromolecules*, 40(21), 7464-7472.
- Korucu E. M., 2010. *PEO/organokil ve PE/organokil nanokompozitlerinin hazirlanmasi ve karakterizasyonu*. (Doktora Tezi), Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Kowatsch, S., 2010. Formaldehyde. *Phenolic Resins: A Century of Progress*, Editor:
- Krishnamoorti, R., Vaia, R. A. and Giannelis, E. P., 1996. Structure and dynamics of polymer-layered silicate nanocomposites. *Chemistry of Materials*, 8(8), 1728-1734.
- Kumar, A. P., Depan, D., Tomer, N. S. and Singh, R. P., 2009. Nanoscale particles for polymer degradation and stabilization—trends and future perspectives. *Progress in Polymer Science*, 34(6), 479-515. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2009.01.002>
- Kumar, A., Anant, R., Kumar, K., Chauhan, S. S., Kumar, S. and Kumar, R., 2016. Anticorrosive and electromagnetic shielding response of a graphene/TiO₂–epoxy nanocomposite with enhanced mechanical properties. *RSC Advances*, 6(114), 113405-113414. DOI <https://doi.org/10.1039/C6RA15273B>
- Kumar, A., and Lingfa, P., 2020. Sodium bentonite and kaolin clays: Comparative study on their FT-IR, XRF, and XRD. *Materials Today: Proceedings*, 22, 737-742. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.10.037>
- Kumar, S., Nehra, M., Dilbaghi, N., Tankeshwar, K. and Kim, K. H., 2018. Recent advances and remaining challenges for polymeric nanocomposites in healthcare applications. *Progress in polymer science*, 80, 1-38. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2018.03.001>
- Kumar, S., Satapathy, B. K. and Patnaik, A., 2012. Thermo-mechanical correlations to erosion performance of short glass/carbon fiber reinforced vinyl ester resin hybrid composites. *Computational Materials Science*, 60, 250-260. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2012.03.021>
- Kumari, N. and Mohan, C., 2021. Basics of clay minerals and their characteristic properties. *Clay and Clay Minerals*, 24 (1), Gustavo Morari Do Nascimento (Ed.), Publish with Intech Open, London.
- Kurokawa, Y., Yasuda, H., Kashiwagi, M., and Oyo, A., 1997. Structure and properties of a montmorillonite/polypropylene nanocomposite. *Journal of Materials Science Letters*, 16(20), 1670-1672.
- Kutuzova, L. and Kandelbauer, A., 2022. Self-healing thermosets. In *Handbook of thermoset plastics*. William Andrew Publishing, Plastics Design Library, 953-1019.

- Kwon, Y. M., Chang, I., and Cho, G. C., 2023. Consolidation and swelling behavior of kaolinite clay containing xanthan gum biopolymer. *Acta Geotechnica*, 18(7), 3555-3571. <https://doi.org/10.1007/s11440-023-01794-8>
- Lagaly, G., 1986. Interaction of alkylamines with different types of layered compounds. *Solid State Ionics*, 22, 43-51
- Lagaly, G., Ogawa, M. and Dékány, I., 2006. Clay mineral organic interactions. *Developments in Clay Science*, 1, 309-377. Doi: 10.1016/S1572-4352(05)01010-X
- Lan, T., Kaviratna, P. D. and Pinnavaia, T. J., 1995. Mechanism of clay tactoid exfoliation in epoxy-clay nanocomposites. *Chemistry of Materials*, 7(11), 2144-2150.
- Le Baron, P.C., Wang, Z., Pinnavaia, T. J., 1999. Polymer-layered silicate nanocomposites: an overview. *Applied Clay Science*, 15, 11-29. [https://doi.org/10.1016/S0169-1317\(99\)00017-4](https://doi.org/10.1016/S0169-1317(99)00017-4)
- Lebeau, B. and Sanchez, C., 1999. Sol-gel derived hybrid inorganic-organic nanocomposites for optics. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 4(1), 11-23. [https://doi.org/10.1016/S1359-0286\(99\)80005-9](https://doi.org/10.1016/S1359-0286(99)80005-9)
- Lee, D. C., and Jang, L. W., 1998. Characterization of epoxy-clay hybrid composite prepared by emulsion polymerization. *Journal of Applied Polymer Science*, 68(12), 1997-2005.
- Lee, S. R., Park, H. M., Lim, H., Kang, T., Li, X., Cho, W. J. and Ha, C. S., 2002. Microstructure, tensile properties, and biodegradability of aliphatic polyester/clay nanocomposites. *Polymer*, 43(8), 2495-2500. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(02\)00012-5](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(02)00012-5)
- Lee, S. S., and Kim, J., 2004. Preparation of the polymer-clay nanocomposites in exfoliated state by interface stabilization. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 42(2), 246-252.
- Li, C., Ma, H., Song, C., Zhou, Z., Xu, W., Song, Q. and Ren, F., 2021. Preparation and performance of melamine-formaldehyde rigid foams with high closed cell content. *Cellular Polymers*, 40(5), 183-197. <https://doi.org/10.1177/02624893211017>
- Li, G. and Shojaei, A. (2012). A viscoplastic theory of shape memory polymer fibres with application to self-healing materials. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 468(2144), 2319-2346. <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.2011.0628>
- Li, X., Luo, J., Li, J. and Gao, Q., 2016. Effects of diatomite inorganic fillers on the properties of a melamine-urea-formaldehyde resin. *Journal of Applied Polymer Science*, 133(41), 10.1002/app.44095. <https://doi.org/10.1002/app.44095>
- Li, Y., Zhao, B., Xie, S. and Zhang, S., 2003. Synthesis and properties of poly (methyl methacrylate)/montmorillonite (PMMA/MMT) nanocomposites. *Polymer International*, 52(6), 892-898. <https://doi.org/10.1002/pi.1121>
- Liao, H., Li, H., Liu, Y. and Wang, Q., 2019. A flame-retardant composite foam: foaming polyurethane in melamine formaldehyde foam skeleton. *Polymer International*, 68 (3), 410-417. DOI 10.1002/pi.5724
- Lim, Y. T. and Park, O. O., 2001. Phase morphology and rheological behavior of polymer/layered silicate nanocomposites. *Rheologica Acta*, 40 (3), 220-229.
- Lin, Y., 2020. Transparent, Lightweight, High Performance Polymer Films and Their Composites (Doctoral dissertation, Queen Mary University of London).

- Liu, J., Yue, K., Xu, L., Wu, J., Chen, Z., Wang, L., Liu, W. and Lu, W., 2020. Bonding performance of melamine-urea-formaldehyde and phenol-resorcinol-formaldehyde adhesive glulams at elevated temperatures. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 98, 102500. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2019.102500>
- Liu, K. and Macosko, C. W., 2019. Can nanoparticle toughen fiber-reinforced thermosetting polymers? *Journal of Materials Science*, 54(6), 4471-4483. <https://doi.org/10.1007/s10853-018-03195-9>
- Liu, L., Qi, Z. and Zhu, X. 1999. Studies on nylon 6/clay nanocomposites by melt-intercalation process. *Journal of Applied Polymer Science*, 71(7), 1133-1138. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628)
- Liu, Y., Zhao, X. and Ye, L., 2016. A novel elastic urea-melamine-formaldehyde foam: structure and properties. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 55 (32), 8743-8750. Doi: 10.1021/acs.iecr.6b01957
- Lodge, T. P. and Hiemenz, P. C., 2020. *Polymer Chemistry*. Editörler: Timothy P. Lodge, Paul C. Hiemenz, Boca Raton, FL, USA.
- Louis Pilato, 25-40, Springer International Publishing, Cham.
- Loyens, W., Jannasch, P. and Maurer, F. H., 2005. Effect of clay modifier and matrix molar mass on the structure and properties of poly (ethylene oxide)/Cloisite nanocomposites via melt-compounding. *Polymer*, 46(3), 903-914. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2004.11.077>
- Luo, J., Zhang, J., Gao, Q., Mao, A. and Li, J., 2019. Toughening and enhancing melamine-urea-formaldehyde resin properties via in situ polymerization of dialdehyde starch and microphase separation. *Polymers*, 11(7), 1-18. <https://doi.org/10.3390/polym11071167>
- Luo, J., Zhang, J., Luo, J., Li, J., and Gao, Q., 2015. Effect of melamine allocation proportion on chemical structures and properties of melamine-urea-formaldehyde resins. *BioResources*, 10(2), 3265-3276.
- Luo, M., Liu, Y., Hu, J., Li, J., Liu, J. and Richards, R. M., 2012. General strategy for one-pot synthesis of metal sulfide hollow spheres with enhanced photocatalytic activity. *Applied Catalysis B: Environmental*, 125, 180-188. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2012.05.041>
- Lutz, J. F., 2013. Writing on polymer chains. *Accounts of Chemical Research*, 46(11), 2696-2705.
- Ma, H., Gao, B., Wang, M., Yuan, Z., Shen, J., Zhao, J., and Feng, Y., 2021. Strategies for enhancing thermal conductivity of polymer-based thermal interface materials: A review. *Journal of Materials Science*, 56, 1064-1086. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05279-x>
- Ma, Y., Zhang, W., Wang, C., Xu, Y., Li, S. and Chu, F., 2013. Preparation and characterization of melamine modified urea-formaldehyde foam. *International Polymer Processing*, 28(2), 188-198. <https://doi.org/10.3139/217.2684>
- Maitra, J. and Shukla, V. K., 2014. Cross-linking in hydrogels-a review. *American Journal of Polymer Science*, 4(2), 25-31. Doi: 10.5923/j.ajps.20140402.01
- Mallakpour, S. and Zadehnazari, A., 2011. Advances in synthetic optically active condensation polymers-A review. *Express Polymer Letters*, 5(2), 142-181. Doi: 10.3144/expresspolymlett.2011.15

- Mammeri, F., Le Bourhis, E., Rozes, L., and Sanchez, C., 2005. Mechanical properties of hybrid organic–inorganic materials. *Journal of Materials Chemistry*, 15(35-36), 3787-3811.
- Mandalina, T. and Bergaya, F. 2006. Organo clay mineral-melted polyolefin nanocomposites Effect of surfactant/KDK ratio. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 67(4), 836-845. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2005.12.007>
- Mao, Q., Schleidt, S., Zimmermann, H. and Jeschke, G., 2008. A pulsed EPR study of surfactant layer structure in composites of a synthetic layered silicate with polystyrene and polycaprolactone. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 10(8), 1156-1167.
- Mayo, F. R. ve Walling, C., 1950. Copolymerization. *Chemical Reviews*, 46(2), 191-287.
- Mazumdar, S. 2001. *Composites manufacturing: materials, product, and process engineering*. Taylor and Francis, CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 416p.
- Md Akil, H., Ahmad Bakhtiar, N. S. A., ve Che Ismail, N. H., 2016. Hybrid polymer layered silicate nanocomposites. *Nanoclay Reinforced Polymer Composites: Nanocomposites and Bionanocomposites*, Editörler: Mohammad Jawaïd, Abou el Kacem Qaïss, Rachid Bouhfid, Springer, 195-207.
- Meetei, T. T., Devi, Y. B. and Chanu, T. T., 2020. Ion exchange: The most important chemical reaction on earth after photosynthesis. *International Research Journal of Pure and Applied Chemistry*, 21(6), 31-42.
- Meinke, O., Hoffmann, B., Dietrich, C., and Friedrich, C., 2003. Viscoelastic properties of polystyrene nanocomposites based on layered silicates. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 204(5-6), 823-830.
- Merline, D. J., Vukusic, S. and Abdala, A. A., 2013. Melamine formaldehyde: curing studies and reaction mechanism. *Polymer journal*, 45(4), 413-419.
- Messersmith, P. B., and Giannelis, E. P., 1995. Synthesis and barrier properties of poly (ϵ -caprolactone) -layered silicate nanocomposites. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 33(7), 1047-1057.
- Michot, A., Smith, D. S., Degot, S., and Gault, C., 2008. Thermal conductivity and specific heat of kaolinite: Evolution with thermal treatment. *Journal of the European Ceramic Society*, 28(14), 2639-2644. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2008.04.007>
- Moad, G., Rizzardo, E. and Thang, S. H., 2008. Radical addition–fragmentation chemistry in polymer synthesis. *Polymer*, 49 (5), 1079-1131, <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2007.11.020>
- Moad, G., Solomon, D.H. 1995. *The chemistry of free radical polymerization*, Pergamon, Oxford.
- Móczó, J. and Pukanszky, B., 2008. Polymer micro and nanocomposites: Structure, interactions, properties. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 14(5), 535-563. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2008.06.011>
- Mohan, P., 2013. A critical review: the modification, properties, and applications of epoxy resins. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 52(2), 107-125.
- Morreale, M., Liga, A., Mistretta, M.C., Ascione, L., La Mantia, F.P., 2015. Mechanical, thermomechanical and reprocessing behavior of green composites from biodegradable polymer and wood flour. *Materials*, 8, 7536–7548. <https://doi.org/10.3390/ma8115406>
- Motherwell, W.B., Crich, D., 1992. *Free radical chain reactions in organic synthesis*. London: Academic Press.

- Mousavi, S. M. M., Afra, E., Tajvidi, M., Bousfield, D. W., and Dehghani-Firouzabadi, M., 2018. Application of cellulose nanofibril (CNF) as coating on paperboard at moderate solids content and high coating speed using blade coater. *Progress in Organic Coatings*, 122, 207-218. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.05.024>
- Murray, H. H., 2006. Structure and composition of the clay minerals and their physical and chemical properties. *Developments in Clay Science*, 2, 7-31. Doi:10.1016/ s1572-4352 (06)02002-2
- Murray, H. H., 1991. Overview—clay mineral applications. *Applied clay science*, 5(5-6), 379-395. [https://doi.org/10.1016/0169-1317\(91\)90014-Z](https://doi.org/10.1016/0169-1317(91)90014-Z)
- Murray, H. H., 2000. Traditional and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite: a general overview. *Applied clay science*, 17(5-6), 207-221. [https://doi.org/10.1016/S0169-1317\(00\)00016-8](https://doi.org/10.1016/S0169-1317(00)00016-8)
- Nadziakiewicz, M., Kehoe, S. and Micek, P., 2019. Physico-chemical properties of clay minerals and their use as a health promoting feed additive. *Animals*, 9 (10), 2-15. <https://doi.org/10.3390/ani9100714>
- Nagendrappa, G., 2002. Organic synthesis using clay catalysts: clays for ‘green chemistry’. *Resonance*, 7, 64-77.
- Naresh, R., Parameshwaran, R., and Ram, V. V., 2022. Microcapsules of n-dodecanoic acid/melamine-formaldehyde with enhanced thermal energy storage capability for solar applications. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 7(3), 100462. <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2022.100462>
- Naskar, A. K., Keum, J. K. and Boeman, R. G., 2016. Polymer matrix nanocomposites for automotive structural components. *Nature Nanotechnology*, 11(12), 1026-1030.
- Nayak, S. K., Mohanty, S., and Nayak, S. K., 2020. Thermal, electrical and mechanical properties of expanded graphite and micro-SiC filled hybrid epoxy composite for electronic packaging applications. *Journal of Electronic Materials*, 49, 212-225. <https://doi.org/10.1007/s11664-019-07681-x>
- Nemanič, V., Zajec, B., Žumer, M., Figar, N., Kavšek, M. and Mihelič, I., 2014. Synthesis and characterization of melamine–formaldehyde rigid foams for vacuum thermal insulation. *Applied Energy*, 114, 320-326. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.09.071>
- Nguyen, Q. T. and Baird, D. G., 2006. Preparation of polymer–clay nanocomposites and their properties. *Advances in Polymer Technology: Journal of the Polymer Processing Institute*, 25(4), 270-285. DOI 10.1002/adv
- Nguyen, V. H., Mahouche-Chergui, S., Carbonnier, B., and Naili, S., 2018. Estimation of effective elastic properties of polymer/clay nanocomposites: A parametric study. *Composites Part B: Engineering*, 152, 139-150. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.06.018>
- Nguyen, V. H., Mahouche-Chergui, S., Carbonnier, B., Di Tommaso, D., and Naili, S., 2017. From atomistic structure to thermodynamics and mechanical properties of epoxy/clay nanocomposites: Investigation by molecular dynamics simulations. *Computational Materials Science*, 139, 191-201. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2017.07.024>
- Odian, G., 2004. *Principles of Polymerization*, 4th ed., John Wiley and Sons: Hoboken, NJ, USA.
- Ogata, N., Kawakage, S., Ogihara, T., 1997. Poly (vinyl alcohol) -clay and poly (ethylene oxide)-clay blends prepared using water as solvent. *Journal of Applied Polymer Science*, 66(3), 573-581.

- Olad, A., Barati, M. and Shirmohammadi, H., 2011. Conductivity and anticorrosion performance of polyaniline/zinc composites: Investigation of zinc particle size and distribution effect. *Progress in Organic Coatings*, 72 (4), 599-604. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2011.06.022>
- Olivera, S., Muralidhara, H. B., Venkatesh, K., Gopalakrishna, K. and Vivek, C. S., 2016. Plating on acrylonitrile–butadiene–styrene (ABS) plastic: a review. *Journal of materials science*, 51, 3657-3674. DOI 10.1007/s10853-015-9668-7
- Omran, A. A. B., Mohammed, A. A., Sapuan, S. M., Ilyas, R. A., Asyraf, M. R. M., Rahimian Koor, S. S., and Petru, M., 2021. Micro-and nanocellulose in polymer composite materials: A review. *Polymers*, 13(2), 231. <https://doi.org/10.3390/polym13020231>
- Osman, A.F., Siah, L., Alrashdi, A.A., Ul-Hamid, A., Ibrahim, I. 2021. Improving the tensile and tear properties of thermoplastic starch/dolomite biocomposite film through sonication process. *Polymers*, 13(274), 2-19. <https://doi.org/10.3390/polym13020274>
- Osman, M. A., Mittal, V., and Suter, U. W., 2007. Poly (propylene)-Layered Silicate Nanocomposites: Gas Permeation Properties and Clay Exfoliation. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 208(1), 68-75. Doi: 10.1002/macp.200600444
- Osman, M. A., Mittal, V., Morbidelli, M. and Suter, U. W., 2003. Polyurethane adhesive nanocomposites as gas permeation barrier. *Macromolecules*, 36(26), 9851-9858.
- Özlüsoylu, İ. and İstek, A. 2019. The effect of hybrid resin usage on thermal conductivity in ecological insulation panel production. *In 4th International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences (ICETAS) April*, pp. 24-28.
- Paiva, N. T., Henriques, A., Cruz, P., Ferra, J. M., Carvalho, L. H., and Magalhães, F. D., 2012. Production of melamine fortified urea-formaldehyde resins with low formaldehyde emission. *Journal of Applied Polymer Science*, 124(3), 2311-2317. DOI 10.1002/app.35282
- Park, B. D. and Jeong, H. W., 2010. Cure kinetics of melamine–formaldehyde resin/clay/cellulose nanocomposites. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 16 (3), 375-379. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2010.01.035>
- Park, B. J., Kim, T. H., Choi, H. J. and Lee, J. H. (2007). Emulsion polymerized polystyrene/montmorillonite nanocomposite and its viscoelastic characteristics. *Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics*, 46(2), 341-354. <https://doi.org/10.1080/00222340601158217>
- Pavlidou, S., Papaspyrides, C., 2008. A review on polymer-layered silicate nanocomposites. *Progress in Polymer Science*, 33, 1119-1198. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2008.07.008>
- Perry, DL. 2011. *Handbook of inorganic compounds*. 2nd ed. Boca Raton: Taylor& Francis.
- Pervez Bhatti, K. and Zuber, M., 2009. Synthesis and application of melamine urea based precondensates. *AUTEX Research Journal*, 9(4), 121-124.
- Petry, T. M. and Das, B., 2001. Evaluation of chemical modifiers and stabilizers for chemically active soils—clays. *Transportation Research Record*, 1757(1), 43-49.
- Pevida, C., Drage, T. C. and Snape, C. E., 2008. Silica-templated melamine–formaldehyde resin derived adsorbents for CO₂ capture. *Carbon*, 46(11), 1464-1474. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2008.06.026>

- Pickering, K. L., Efendy, M. A., and Le, T. M., 2016. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 83, 98-112. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.038>
- Pizzi, A. and Ibeh, C. C., 2022. *Aminoresins*. In Handbook of Thermoset Plastics (pp. 65-82). William Andrew Publishing.
- Pizzi, A., 2003. *Handbook of Adhesive Technology*, Melamine-Formaldehyde Resins, A.Pizzi and K.L. Mittal editors, Second Edition, Marcel Dekker, New York, 653-680.
- Pizzi, A., 2018. *Handbook of Adhesive Technology*, Urea and Melamine Aminoresin Adhesives, Third Edition, 283-321, Taylor and Francis, CRC Press, Boca Raton.
- Plummer, C. J., Garamszegi, L., Leterrier, Y., Rodlert, M., and Månson, J. A. E., 2002. Hyperbranched polymer layered silicate nanocomposites. *Chemistry of Materials*, 14(2), 486-488.
- Plummer, C. J., Rodlert, M., Bucaille, J. L., Grünbauer, H. J. and Månson, J. A. E., 2005. Correlating the rheological and mechanical response of polyurethane nanocomposites containing hyperbranched polymers. *Polymer*, 46(17), 6543-6553. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.05.006>
- Pohl, W.L. 2011. *Economic Geology: Principles and Practice: Metals, Minerals, Coal and Hydrocarbons – Introduction to Formation and Sustainable Exploitation of Mineral Deposits*. Chichester: Wiley, p. 331. Doi:10.1002/9781444394870
- Pol, M. H. and Liaghat, G. H., 2017. Studies on the mechanical properties of composites reinforced with nanoparticles. *Polymer Composites*, 38(1), 205-212. DOI 10.1002/pc.23577
- Pol, M. H., Liaghat, G., Zamani, E., and Ordys, A., 2015. Investigation of the ballistic impact behavior of 2D woven glass/epoxy/nanoclay nanocomposites. *Journal of Composite Materials*, 49(12), 1449-1460. <https://doi.org/10.1177/00219983145350>.
- Pour, M. F., Khanjanzadeh, H., Dorieh, A., Kiamahalleh, M. V., and Hoseini, K. D., 2022. Utilization of phenol formaldehyde/Fe₃O₄ nanocomposite as microwave preheating amplifier in laminated veneer lumber (LVL) structure. *Journal of Building Engineering*, 46, 103809. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103809>
- Pour, M. F., Mehdinia, M., Kiamahalleh, M. V., Hoseini, K. D., Hatefnia, H. and Dorieh, A., 2022. Biological durability of particleboard: fungicidal properties of Ag and Cu nanoparticles against *Trametes versicolor* white-rot fungus. *Wood Material Science & Engineering*, 17(6), 929-936. <https://doi.org/10.1080/17480272.2021.1977996>
- Qin, Y., Dong, Y. and Li, J. 2019. Effect of modification with melamine–urea–formaldehyde resin on the properties of eucalyptus and poplar. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 39(5), 360-371. <https://doi.org/10.1080/02773813.2019.1636821>
- Quirino, R. L., Monroe, K., Fleischer III, C. H., Biswas, E. and Kessler, M. R., 2021. Thermosetting polymers from renewable sources. *Polymer International*, 70(2), 167-180. DOI 10.1002/pi.6132
- Radoman, T. S., Džunuzović, J. V., Jeremić, K. B., Grgur, B. N., Miličević, D. S., Popović, I. G., Džunuzović, E. S., 2014. Improvement of epoxy resin properties by incorporation of TiO₂ nanoparticles surface modified with gallic acid esters. *Materials & Design (1980-2015)*, 62, 158-167. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.05.015>

- Rahromostaqim, M. and Sahimi, M., 2018. Molecular dynamics simulation of hydration and swelling of mixed-layer clays. *The Journal of Physical Chemistry C*, 122(26), 14631-14639. Doi: 10.1021/acs.jpcc.8b03693
- Rajeshkumar, G., Seshadri, S. A., Ramakrishnan, S., Sanjay, M. R., Siengchin, S. and Nagaraja, K. C. 2021. A comprehensive review on natural fiber/nano-clay reinforced hybrid polymeric composites: Materials and technologies. *Polymer Composites*, 42(8), 3687-3701. Doi: 10.1002/pc.26110
- Ram, A., 1997. *Fundamentals of polymer engineering*. Plenum Press, New York, 18-21.
- Ramakrishnan, T., Mohan Gift, M. D., Chitradevi, S., Jegan, R., Hency Jose, P. S., Nagaraja, H. N., Sharma, R., Selvakumar, P and Hailegiorgis, S. M., 2022. Study of numerous resins used in polymer matrix composite materials. *Advances in Materials Science and Engineering*, (1), 1088926. <https://doi.org/10.1155/2022/1088926>
- Ramon, E., Sguazzo, C. and Moreira, P. M., 2018. A review of recent research on bio-based epoxy systems for engineering applications and potentialities in the aviation sector. *Aerospace*, 5(4), 110. <https://doi.org/10.3390/aerospace5040110>
- Ramsden, J., 2016. *Nanotechnology: an Introduction*, Second Edition, Elsevier, Cambridge.
- Rashid, M., Islam, M. M., Minami, H., Aftabuzzaman, M., Rahman, M. A., Hossain, M. M., Hoque, S. M., Alam, M. A., and Ahmad, H., 2020. Nickel decorated melamine-formaldehyde resin/polyaniline composites for high specific capacitance. *Materials Chemistry and Physics*, 249, 122957, <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.122957>
- Ray, S. S. and Okamoto, M., 2003. Polymer/layered silicate nanocomposites: a review from preparation to processing. *Progress Polymer Science*, 28, 1539–1641. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2003.08.002>
- Razaghi, K.M., Hasankhani, H., Koukabi, M. 2007. Improvement in physical and mechanical properties of butyl rubber with montmorillonite organo-clay. *Iranian Polymer Journal*, 16(10), 671–679.
- Razali, N., Sa'don, N. M. and Karim, A. R. A. 2022. Strength enhancement of reinforced peat with rubber waste and melamine urea formaldehyde (MUF) resin. *Journal of Engineering Science and Technology*, 17(6), 3872-3892.
- Rehab, A., and Salahuddin, N., 2005. Nanocomposite materials based on polyurethane intercalated into montmorillonite clay. *Materials Science and Engineering: A*, 399(1-2), 368-376. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.04.019>
- Rezaei, R., Mohammadi, M. K. and Khaledi, A., 2013. Microwave assisted solvent-free one pot biginelli synthesis of dihydropyrimidinone compounds on melamine-formaldehyde as a solid support. *Asian Journal of Chemistry*, 25(8), 4588.
- Ricciotti, L., Roviello, G., Tarallo, O., Borbone, F., Ferone, C., Colangelo, F., Catauro, M., Cioffi, R., 2013. Synthesis and characterizations of melamine-based epoxy resins. *International Journal of Molecular Sciences*, 14 (9), 18200-18214. <https://doi.org/10.3390/ijms140918200>
- Robertson, R.H.S. 1986. *Fuller's Earth. A History of calcium montmorillonite*. Volturna, Press, Hythe, England. 421p
- Roco, M. C., 2011. The long view of nanotechnology development: the National Nanotechnology Initiative at 10 years. *Journal of Nanoparticle Research*, 13, 427-445. DOI 10.1007/s11051-010-0192-z

- Rodlert, M., Plummer, C. J., Garamszegi, L., Leterrier, Y., Grünbauer, H. J. and Månson, J. A. E., 2004. Hyperbranched polymer/montmorillonite clay nanocomposites. *Polymer*, 45(3), 949-960. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2003.12.015>
- Rodlert, M., Plummer, C. J., Leterrier, Y., Månson, J. A. E. and Grünbauer, H. J., 2004b. Rheological behavior of hyperbranched polymer/montmorillonite clay nanocomposites. *Journal of Rheology*, 48(5), 1049-1065.
- Rodriguez, F., Cohen, C., Ober, C.K., Archer, L. 2014. *Principles of Polymer Systems*, Taylor and Francis, CRC Press: Boca Raton, FL, USA.
- Romero-Gómez, M. I., Silva, R. V., Costa-Pereira, M. F. and Flores-Colen, I., 2022. Thermal and mechanical performance of gypsum composites with waste cellulose acetate fibres. *Construction and Building Materials*, 356, 129308. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129308>
- Rouhani, M. and Ramazani, A., 2018. Perlite–SO₃H nanoparticles: very efficient and reusable catalyst for three-component synthesis of N-cyclohexyl-3-aryl-quinoxaline-2-amine derivatives under ultrasound irradiation. *Journal of the Iranian Chemical Society*, 15, 2375-2382. <https://doi.org/10.1007/s13738-018-1426-8>
- Rudawska, A., 2017. Epoxy adhesives. In *Handbook of Adhesive Technology* (pp. 415-441). Taylor and Francis, CRC Press.
- Rudresh, B. M., Ravi Kumar, B. N. and Madhu, D., 2019. Combined effect of micro-and nano-fillers on mechanical, thermal, and morphological behavior of glass–carbon PA66/PTFE hybrid nano-composites. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2, 176-188. <https://doi.org/10.1007/s42114-019-00089-5>
- Saba, N., Md Tahir, P. and Jawaid, M. 2014. A review on potentiality of nano filler/natural fiber filled polymer hybrid composites. *Polymers*, 6(8), 2247-2273. doi:10.3390/polym6082247
- Sakae, T., Sato, Y., Numata, Y., Suwa, T., Hayakawa, T., Suzuki, K., Kuwada, T., Hayakawa, K., Hayakawa, Y., Tanaka, T., *et al.* 2007. Thermal ablation of FEL irradiation using gypsum as an indicator. *Lasers in Medical Science*, 22, 15–20. DOI 10.1007/s10103-006-0414-x
- Sanchez, C. and Ribot, F., 1994. Design of hybrid organic-inorganic materials synthesized via sol-gel chemistry. *New Journal of Chemistry*, 18(10), 1007-1047.
- Sanchez, C., Lebeau, B., 2001. Design and properties of hybrid organic–inorganic nanocomposites for photonics. *Mrs Bulletin*, 26(5), 377-387.
- Sandberg, D., 2016. Additives in wood products—today and future development. *Environmental impacts of traditional and innovative forest-based Bioproducts*, 105-172, Springer.
- Santos, E. C. D., Bandeira, R. M., Vega, M. L. and Santos, J. R. D., 2021. Poly (melamine-formaldehyde-silica) composite hydrogel for methylene blue removal. *Materials Research*, 24(4), 1-15. Doi: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2020-0574>
- Sarıkaya, Y., 2003. *Fizikokimya*. Gazi Kitabevi, Ankara.
- Sarkar, B., Singh, M., Mandal, S., Churchman, G. J. and Bolan, N. S., 2018. *Clay minerals-Organic matter interactions in relation to carbon stabilization in soils*. Chapter 3. In *The Future of Soil Carbon* pp. 71-86. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811687-6.00003-1>

- Sarma, G. K., Sen Gupta, S. and Bhattacharyya, K. G., 2019. Removal of hazardous basic dyes from aqueous solution by adsorption onto kaolinite and acid-treated kaolinite: kinetics, isotherm and mechanistic study. *SN Applied Sciences*, 1, 1-15.
<https://doi.org/10.1007/s42452-019-0216-y>
- Satpute, M. S., Sambhe, R. U. and Chaudhari, R. R., 2022. The Fundamentals of Epoxy Composites with Filler for Different Applications: A Review. *Int J Sci Res Sci Technol*, 88-100. doi : <https://doi.org/10.32628/IJSRST229113>
- Sattar, M. A., 2021. Interface structure and dynamics in Polymer-nanoparticle hybrids: A review on molecular mechanisms underlying the improved interfaces. *Chemistry Select*, 6(20), 5068-5096. doi.org/10.1002/slct.2021008
- Schoonheydt, R. A. and Johnston, C. T., 2011. The surface properties of clay minerals. *EMU Notes Mineral*. 11, 337-373. Doi: <https://doi.org/10.1180/EMU-notes.11.10>
- Schroeder, P.A., 2020. Kaolin. New Georgia Encyclopedia. Available from <https://www.britannica.com/science/kaolin>. (Accessed on 2020-07-31).
- Schubert, U., 2003. Silica-based and transition metal-based inorganic-organic hybrid materials—A comparison. *Journal of sol-gel science and technology*, 26(1), 47-55.
- Schulze, D. G., 2002. An introduction to soil mineralogy. *Soil Mineralogy with Environmental Applications*, 7, 1-35.
- Schwinger, L., Lehmann, S., Zielbauer, L., Scharfe, B., Gerdes, T., 2019. Aluminum coated micro glass spheres to increase the infrared reflectance. *Coatings*, 9(187), 2-20. Doi:10.3390/coatings9030187
- Sepehr, M. N., Amrane, A., Karimaian, K. A., Zarrabi, M. and Ghaffari, H. R., 2014. Potential of waste pumice and surface modified pumice for hexavalent chromium removal: characterization, equilibrium, thermodynamic and kinetic study. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 45(2), 635-647, <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2013.07.005>
- Sever, K., Atagür, M., Tunçalp, M., Altay, L., Seki, Y. and Sarıkanat, M., 2019. The effect of pumice powder on mechanical and thermal properties of polypropylene. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 32(8), 1092-1106, DOI: 10.1177/0892705718785692
- Seymour, R. B. (1976). The role of fillers and reinforcements in plastics technology. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 7(1), 49-79. <https://doi.org/10.1080/03602557608063110>
- Shah, K. J., Mishra, M. K., Shukla, A. D., Imae, T. and Shah, D. O., 2013. Controlling wettability and hydrophobicity of organoclays modified with quaternary ammonium surfactants. *Journal of Colloid and Interface Science*, 407, 493-499. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2013.05.050>
- Shen, J., Lin, X., Liu, J. and Li, X., 2018. Effects of cross-link density and distribution on static and dynamic properties of chemically cross-linked polymers. *Macromolecules*, 52(1), 121-134. Doi: 10.1021/acs.macromol.8b01389
- Shen, Y., Golnaraghi, M. F. and Heppler, G. R., 2004. Experimental research and modeling of magnetorheological elastomers. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 15 (1), 27-35. Doi: 10.1177/1045389X04039264
- Silva, M. P., Santos, P., Parente, J. M., Valvez, S., Reis, P. N. and Piedade, A. P., 2020. Effect of post-cure on the static and viscoelastic properties of a polyester resin. *Polymers*, 12(9), 1927. <https://doi.org/10.3390/polym12091927>

- Singh, B., Bouchet, J., Rochat, G., Leterrier, Y., Manson, J. A. and Fayet, P., 2007. Ultra-thin hybrid organic/inorganic gas barrier coatings on polymers. *Surface and Coatings Technology*, 201(16-17), 7107-7114. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.01.013>
- Singla, P., Mehta, R. and Upadhyay, S. N., 2012. Clay modification by the use of organic cations. *Green and Sustainable Chemistry*, 2(1), 21-25. <http://dx.doi.org/10.4236/gsc.2012.21004>
- Sinha, A. K., Narang, H. K., and Bhattacharya, S., 2020. Mechanical properties of hybrid polymer composites: a review. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(8), 431. <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02517-w>
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S. and Denef, K., 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*, 79(1), 7-31. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008>
- Sohn, J. I., Lee, C. H., Lim, S. T., Kim, T. H., Choi, H. J. and Jhon, M. S., 2003. Viscoelasticity and relaxation characteristics of polystyrene/clay nanocomposite. *Journal of Materials Science*, 38, 1849-1852.
- Solomon, M. J., Almusallam, A. S., Seefeldt, K. F., Somwangthanaroj, A. and Varadan, P., 2001. Rheology of polypropylene/clay hybrid materials. *Macromolecules*, 34(6), 1864-1872.
- Song, P. and Wang, H., 2020. High-performance polymeric materials through hydrogen-bond cross-linking. *Advanced Materials*, 32(18), 1901244. Doi: 10.1002/adma.201901244
- Sonnenfeld, C., Mendil-Jakani, H., Agogu  , R., Nunez, P. and Beauch  ne, P., 2017. Thermoplastic/thermoset multilayer composites: A way to improve the impact damage tolerance of thermosetting resin matrix composites. *Composite Structures*, 171, 298-305. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.03.044>
-   ova, D., Stanciu, M. D. and Georgescu, S. V., 2021. Design of thermal insulation materials with different geometries of channels. *Polymers*, 13(13), 2217. <https://doi.org/10.3390/polym13132217>
- Stevens, M. P., 1999. *Polymer Chemistry: An Introduction*, Oxford University Press, Oxford, UK.
- Strawhecker, K. E. and Manias, E., 2000. Structure and properties of poly (vinyl alcohol) /Na⁺ montmorillonite nanocomposites. *Chemistry of Materials*, 12(10), 2943-2949.
- Stuart, B. H., 2002. *Polymer Analysis (Analytical Techniques in the Sciences (AnTS))*. Chapter 3, Editor: Barbara H. Stuart, John Wiley and Sons, Sydney, Australia.
- Sun, T., Fan, H., Wang, Z., Liu, X. and Wu, Z., 2015. Modified nano Fe₂O₃-epoxy composite with enhanced mechanical properties. *Materials & Design*, 87, 10-16. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.177>
- Suresha, B., Chandramohan, G., Siddaramaiah Renukappa, N. M., 2009. Influence of silicon carbide filler on mechanical and dielectric properties of glass fabric reinforced epoxy composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 111(2), 685-691. <https://doi.org/10.1002/app.29116>
- Suresha, B., Divya, G.S., Hemanth, G., Somashekar, H.M., 2021. Physico-mechanical properties of nano silica-filled epoxy-based mono and hybrid composites for structural applications. *Silicon*, 13, 2319–2335. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00812-8>

- Susan George, J., Uthaman, A., Reghunadhan, A., Mayookh Lal, H., Thomas, S. and Vijayan P. P., 2022. Bioderived thermosetting polymers and their nanocomposites: current trends and future outlook. *Emergent Materials*, 5(1), 3-27. <https://doi.org/10.1007/s42247-022-00362-2>
- Szeluga, U., Kumanek, B. and Trzebicka, B., 2015. Synergy in hybrid polymer/nanocarbon composites. A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 73, 204-231. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.02.021>
- Talaiekhazani, A., Fulazzaky, M. A., Ponraj, M. and Abd Majid, Z. M., 2013. Formaldehyde from production to application. In *the 3th Conference of Application of Chemistry in Novel Technologies* (pp. 1-16).
- Tamai, H., 2015. Enhancing the performance of porous concrete by utilizing the pumice aggregate. *Procedia Engineering*, 125, 732-738.
- Thakur, V. K. and Thakur, M. K., 2014. Processing and characterization of natural cellulose fibers/thermoset polymer composites. *Carbohydrate Polymers*, 109, 102-117. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.03.039>
- Theng, B. K., 2024. *The chemistry of clay-organic reactions*. Taylor and Francis, CRC Press.
- Thostenson, E. T., Li, C. and Chou, T. W., 2005. Nanocomposites in context. *Composites Science and Technology*, 65(3-4), 491-516. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2004.11.003>
- Thostenson, E. T., Ren, Z. and Chou, T. W., 2001. Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: a review. *Composites Science and Technology*, 61(13), 1899-1912. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(01\)00094-X](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(01)00094-X)
- Tironi, A., Trezza, M. A., Irassar, E. F. and Scian, A. N., 2012. Thermal treatment of kaolin: effect on the pozzolanic activity. *Procedia Materials Science*, 1, 343-350. doi: 10.1016/j.mspro.2012.06.046
- Tjong, S. C., 2006. Structural and mechanical properties of polymer nanocomposites. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 53 (3-4), 73-197. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2006.06.001>
- Tole, I., Habermehl-Cwirzen, K. and Cwirzen, A., 2019. Mechanochemical activation of natural clay minerals: an alternative to produce sustainable cementitious binders—review. *Mineralogy and Petrology*, 113, 449-462. <https://doi.org/10.1007/s00710-019-00666-y>
- Tong, WK. 2000. Introduction to Clay Minerals. Available from [https:// www.oakton.edu/user/4/billtong/ eas100/clays.htm](https://www.oakton.edu/user/4/billtong/eas100/clays.htm) (Accessed on 2020-07-23).
- Toorchi, D., Tohidlou, E. and Khosravi, H., 2022. Enhanced flexural and tribological properties of basalt fiber-epoxy composite using nano-zirconia/graphene oxide hybrid system. *Journal of Industrial Textiles*, 51, 3238-3252, DOI: 10.1177/1528083720920573.
- Tournassat, C., Bourg, I. C., Steefel, C. I. and Bergaya, F., 2015. Surface properties of clay minerals. In *Developments in clay science*, 6, 5-31. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100027-4.00001-2>
- Tsang, C. W., Yam, M. and Gates, D. P., 2003. The Addition Polymerization of a PC Bond: A Route to New Phosphine Polymers. *Journal of the American Chemical Society*, 125 (6), 1480-1481.
- Tseng, C. R., Wu, J. Y., Lee, H. Y. and Chang, F. C., 2002. Preparation and characterization of polystyrene–clay nanocomposites by free-radical polymerization. *Journal of Applied Polymer Science*, 85(7), 1370-1377.

- Turcsan, T. and Meszaros, L., 2017. Mechanical performance of hybrid thermoset composites: Effects of matrix and reinforcement hybridization. *Composites Science and Technology*, 141, 32-39.
- Uddin, F., 2008. Clays, nanoclays and montmorillonite clay minerals. *Metallurgical and Material Transaction*, 39, 2804-2814.
- Ugochukwu, U. C., 2019. Characteristics of clay minerals relevant to bioremediation of environmental contaminated systems. In *Modified Clay and Zeolite Nanocomposite Materials* chapter 9, 219-242. Editor: Mariano Mercurio, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814617-0.00006-2>
- Unuabonah, E. I., Olu-Owolabi, B. I., Adebowale, K. O. and Ofomaja, A. E., 2007. Adsorption of lead and cadmium ions from aqueous solutions by tripolyphosphate-impregnated Kaolinite clay. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 292 (2-3), 202-211. Doi:10.1016/j.colsurfa.2006.06.024
- Usuki, A., Kawasumi, M., Kojima, Y., Okada, A., Kurauchi, T. and Kamigaito, O., 1993. Swelling behavior of montmorillonite cation exchanged for ω -amino acids by ϵ -caprolactam. *Journal of Materials Research*, 8(5), 1174-1178. Doi: <https://doi.org/10.1557/JMR.1993.1174>
- Utekar, S., Suriya, V. K., More, N. and Rao, A., 2021. Comprehensive study of recycling of thermosetting polymer composites—Driving force, challenges and methods. *Composites Part B: Engineering*, 207, 108596. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108596>
- Utracki, L. A., 2004. Clay-containing polymeric nanocomposites (Vol. 1). iSmithers Rapra Publishing. ISBN: 1859574378, 9781859574379
- Uysal, H., Demirboğa, R., Şahin, R. and Gül, R., 2004. The effects of different cement dosages, slumps, and pumice aggregate ratios on the thermal conductivity and density of concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(5), 845-848. doi:10.1016/j.cemconres.2003.09.018
- Vaia, R. A., Jandt, K. D., Kramer, E. J. and Giannelis, E. P., 1996. Microstructural evolution of melt intercalated polymer—organically modified layered silicates nanocomposites. *Chemistry of Materials*, 8(11), 2628-2635.
- Vaia, R.A., Giannelis, E.P., 1997. Lattice model of polymer melt intercalation in organically-modified layered silicates. *Macromolecules*, 30, 7990–7999.
- Velde, B. and Meunier, A., 2008. Fundamentals of clay mineral crystal structure and physicochemical properties. *The origin of clay minerals in soils and weathered rocks*, 3-73, Springer.
- Verbung K, Baveye P., 1994. Hysterisis in the binary exchange of cations on 2:1 clay minerals: A critical review. *Clays and Clay Minerals*, 42, 207-220. Doi: 10.1346/CCMN.1994.0420211
- Vijayan, P. P., Puglia, D., Pionteck, J., Kenny, J. M. and Thomas, S., 2015. Liquid-rubber-modified epoxy/clay nanocomposites: effect of dispersion methods on morphology and ultimate properties. *Polymer Bulletin*, 72, 1703-1722. DOI 10.1007/s00289-015-1365-9
- Vijayaram, T. R., 2009. A technical review on rubber. *International Journal on Design and Manufacturing Technologies*, 3(1), 25-37.
- Wada, K., 1989. Allophane and Imogolite in minerals in soil environments. *Soil Science Society of America*, 1, 1051-1087. <https://doi.org/10.2136/sssabookser1.2ed.c21>

- Wall, F. T., 1944. The structure of copolymers. II1. *Journal of the American Chemical Society*, 66 (12), 2050-2057.
- Wang, C., Wang, Q. and Chen, X., 2005. Intercalated PS/Na⁺-MMT nanocomposites prepared by ultrasonically initiated in situ emulsion polymerization. *Macromolecular Materials and Engineering*, 290 (9), 920-926. <https://doi.org/10.1002/mame.200500023>
- Wang, D., Zhang, X., Luo, S. and Li, S., 2012. Preparation and property analysis of melamine formaldehyde foam. *Advances in Materials Physics and Chemistry*, 2 (04), 63-67.
- Wang, H., Yan, R., Cheng, H., Zou, M., Wang, H. and Zheng, K., 2023. Hollow glass microspheres/phenolic syntactic foams with excellent mechanical and thermal insulate performance. *Frontiers in Chemistry*, 11, 1216706. <https://doi.org/10.3389/fchem.2023.1216706>
- Wang, L. and Aslani, F., 2019. A review on material design, performance, and practical application of electrically conductive cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 229, 116892. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116892>
- Wang, M., Fan, X., Thitsartarn, W., He, C., 2015. Rheological and mechanical properties of epoxy/clay nanocomposites with enhanced tensile and fracture toughnesses. *Polymer* 58, 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2014.12.042>
- Wang, S., Gainey, L., Mackinnon, I. D., Allen, C., Gu, Y. and Xi, Y., 2023. Thermal behaviors of clay minerals as key components and additives for fired brick properties: A review. *Journal of Building Engineering*, 66, 105802. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105802>
- Wang, X., Han, Z., Liu, Y. and Wang, Q., 2020. Micro-nano surface structure construction and hydrophobic modification to prepare efficient oil-water separation melamine formaldehyde foam. *Applied Surface Science*, 505, 144577. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144577>
- Wang, X., Li, C. and Zhao, T., 2018. Fabrication and characterization of poly (melamine-formaldehyde) /silicon carbide hybrid microencapsulated phase change materials with enhanced thermal conductivity and light-heat performance. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 183, 82-91. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.03.019>
- Wanyika, H. and Gachanja, A., 2016. Instrumental characterization of montmorillonite clays by X-ray fluorescence spectroscopy, fourier transform infrared spectroscopy, X-ray diffraction and UV/visible spectrophotometry. *Journal of Agriculture, Science and Technology*, 17(1), 224-239.
- Weimer, M. W., Chen, H., Giannelis, E. P. and Sogah, D. Y., 1999. Direct synthesis of dispersed nanocomposites by in situ living free radical polymerization using a silicate-anchored initiator. *Journal of the American Chemical Society*, 121(7), 1615-1616.
- Williams-Daryn, S. and Thomas, R. K., 2002. The intercalation of a vermiculite by cationic surfactants and its subsequent swelling with organic solvents. *Journal of Colloid and Interface Science*, 255 (2), 303-311. <https://doi.org/10.1006/jcis.2002.8673>
- Woo, H. G., Li, H., Ha, C. S. and Mathews, A. S., 2011. *Polyimides and high performance organic polymers*. Advanced functional materials, Chapter 1, pp. 1-36, Springer.
- Wu, C. L., Zhang, M. Q., Rong, M. Z. and Friedrich, K., 2002. Tensile performance improvement of low nanoparticles filled-polypropylene composites. *Composites Science and Technology*, 62(10-11), 1327-1340. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(02\)00079-9](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(02)00079-9)

- Wypych, F. and de Freitas, R. A., 2022. Clay minerals: Classification, structure, and properties. In *Developments in Clay Science, Chapter 1*, (Vol. 10, pp. 3-35). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91858-9.00004-5>
- Xia, H. and Wang, Q., 2003. Preparation of conductive polyaniline/nanosilica particle composites through ultrasonic irradiation. *Journal of Applied Polymer Science*, 87(11), 1811-1817. <https://doi.org/10.1002/app.11627>
- Xia, X., 2010. Computational modelling study of yttria-stabilized zirconia. Doctoral dissertation, UCL, University College London.
- Xie, T. X., Yang, G.S., Fang, X. P., Ou, F.C., 2003. Synthesis and characterization of poly (methylmethacrylate)/montmorillonite nanocomposite by in-situ bulk polymerization. *Journal Applied Polymer Science*, 89, 2256-2260. <https://doi.org/10.1002/app.12468>
- Xiong, Z., Chen, N. and Wang, Q., 2021. Preparation and properties of melamine formaldehyde resin modified by functionalized nano-SiO₂ and polyvinyl alcohol. *Polymers and Polymer Composites*, 29(2), 96-106. <https://doi.org/10.1177/0967391120903548>
- Yakar, Z., 2018. *Nanotechnology 1 fundamentals of nanotechnology, development of nanotechnology*, Editörler: M. Ersöz, A. Işitan ve M. Balaban, Bilal Ofset, Denizli.
- Yan, C., Luo, Y. J., Zhang, W. G., Zhu, Z. F., Li, P. Y., Li, N., Chen, Y.F. and Jin, T., 2022. Preparation of a novel melamine foam structure and properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 139 (16), 51992. <https://doi.org/10.1002/app.51992>
- Yang, B., Chen, J., Liu, B., Ding, Y., Tang, Y. and Yan, X., 2021. One dimensional graphene nanoscroll-wrapped MnO nanoparticles for high-performance lithium ion hybrid capacitors. *Journal of Materials Chemistry A*, 9(10), 6352-6360. DOI <https://doi.org/10.1039/D1TA00404B>
- Yariv, S., 2002. Introduction to organo-clay complexes and interactions. *Organo-clay Complexes and Interactions, Chapter 2*, 8, 39-112., CRC Press.
- Yashas Gowda, T. G., Sanjay, M. R., Subrahmanya Bhat, K., Madhu, P., Senthamarai kannan, P. and Yogesha, B., 2018. Polymer matrix-natural fiber composites: An overview. *Cogent Engineering*, 5(1), 1446667. <https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1446667>
- Yasmin, A., Luo, J. J. and Daniel, I. M. 2006. Processing of expanded graphite reinforced polymer nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 66 (9), 1182-1189. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.10.014>
- Yi, C., Li, W., Shi, S., He, K., Ma, P., Chen, M. and Yang, C., 2020. High-temperature-resistant and colorless polyimide: Preparations, properties, and applications. *Solar Energy*, 195, 340-354. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.048>
- Yokoyama, A. and Yokozawa, T., 2007. Converting step-growth to chain-growth condensation polymerization. *Macromolecules*, 40 (12), 4093-4101.
- Yokozawa, T. and Yokoyama, A., 2009. Chain-growth condensation polymerization for the synthesis of well-defined condensation polymers and π -conjugated polymers. *Chemical Reviews*, 109 (11), 5595-5619.
- Young, R. J. and Lovell, P. A., 1991. *Introduction to Polymers*, 2nd Edn, Chapman and Hall, London.
- Yu, C., Xu, W., Zhao, X., Xu, J., and Jiang, M., 2014. Effects of the reaction degree of melamine-formaldehyde resin on the structures and properties of melamine-formaldehyde/polyvinyl alcohol composite fiber. *Fibers and Polymers*, 15, 1828-1834.

- Zengin, A. C. A., Crudu, M., Maier, S. S., Deselnicu, V., Albu, L., Gulumser, G., Bitlisli, B.O., Basaran, B. and Mutlu, M. M., 2012. Eco-leather: Chromium-free leather production using titanium, oligomeric melamine-formaldehyde resin, and resorcinol tanning agents and the properties of the resulting leathers. *Ekoloji*, 21 (82), 17-25.
Doi: 10.5053/ekoloji.2011.823
- Zhang, W., Zhangsun, X., and Tao, Y., 2021. Photocatalytic degradation of Red 2G on the suspended TiO₂-hollow glass sphere. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, 134, 569-578.
- Zhang, Y., Duan, H., Wang, X., Meng, X. and Qin, D., 2013. Preparation and properties of composites based on melamine-formaldehyde foam and nano-Fe₃O₄. *Journal of Applied Polymer Science*, 130 (4), 2688-2697. <https://doi.org/10.1002/app.39514>
- Zhao, Q., Bahadur, S. 1999. The mechanism of filler action and the criterion of filler selection for reducing wear. *Wear*, 225–229. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00023-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00023-X)
- Zhong, Y., Zhu, Z., Wang, S.Q., 2005. Synthesis and rheological properties of polystyrene/layered silicate nanocomposite, *Polymer*, 46, 3006.
<https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.02.014>
- Zhou, X., Pizzi, A. and Du, G., 2012. The effect of nanoclay on melamine-urea-formaldehyde wood adhesives. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 26(10-11), 1341-1348.
- Zhu, P., Gu, Z., Hong, S., and Lian, H., 2018. Preparation and characterization of microencapsulated LDHs with melamine-formaldehyde resin and its flame retardant application in epoxy resin. *Polymers for Advanced Technologies*, 29(7), 2147-2160.
<https://doi.org/10.1002/pat.4323>
- Zhu, T. T., Zhou, C. H., Kabwe, F. B., Wu, Q. Q., Li, C. S. and Zhang, J. R., 2019. Exfoliation of montmorillonite and related properties of clay/polymer nanocomposites. *Applied Clay Science*, 169, 48-66. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.12.006>
- Zuo, Z., Sha, Y., Wang, P. and Da, Z. J., 2023. The application of all-inorganic solid base materials in heterogeneous catalysis: A mini review. *Authorea Preprints*. Doi: 10.22541/au.169267934.48876667/v1

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Elif ŞAHİN
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Malatya Sümer Lisesi (2002)
Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Kazım Karabekir Eğitim Fakültesi Fen Bilgisi Eğitimi (2008)
Yüksek Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Eğitim Bilimleri Enstitüsü, Kimya Eğitimi (2013)
Doktora:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Nanobilim ve Nanomühendislik (2024)
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	Normal
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	
- Gürses, A. and Şahin, E. (2023). Preparation of Melamine Formaldehyde Foam and a Melamine Formaldehyde-Organo-Clay Nanocomposite and Hybrid Composites. Minerals, 13 (11), 1407. - Gürses, A., and Şahin, E. (2024). Preparation of Melamine Urea Formaldehyde Organo Clay Nanocomposite Foams Using Thermal Processing and Microwave Irradiation Techniques and Investigation of Their Thermal Insulation and Compressive Strength. Polymer Science, Series B, 1-12.	