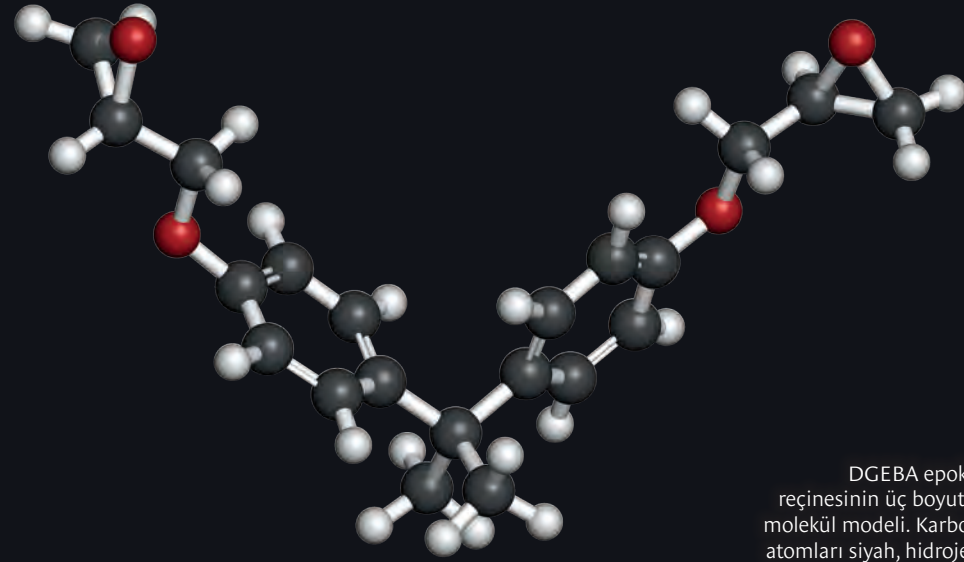


Epoksi Reçine Teknolojileri

Dr. Tuncay Baydemir | TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi

İnsanlar tarafından geliştirilip kullanıma sunulan tüm nesnelerin temelinde amaca uygun şekilde hizmet edecek malzemeler yatıyor. Bu nedenle belirli bir uygulama ve kullanım için malzeme seçerken ya da geliştirirken bu malzemenin istenilen son özelliklere sahip olması ya da işlendikten sonra bu özellikleri sağlaması gerekiyor. Özellikle havacılık ve uzay, tıp, otomotiv, denizcilik, inşaat ve elektrik-elektronik gibi alanlarda kullanılacak malzemelerin seçiminde verilecek kararlar büyük önem taşıyor. Örneğin, havacılık ve uzay alanları söz konusu olduğunda daha hafif malzemelerin kullanılması maliyetleri büyük oranda düşürüyor. Elbette burada malzemedeki aranacak tek özellik hafif olması değildir. Bunun yanında malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin de istenilen düzeyde olması gerekir. İşte tam burada diğer malzemeler arasında epoksi reçineler ve epoksi kompozitler hem araştırmalarda hem de tüm endüstriyel faaliyetlerde kullanılmak üzere ön plana çıkıyor.





DGEBA epoksi reçinesinin üç boyutlu molekül modeli. Karbon atomları siyah, hidrojen atomları gri ve oksijen atomları kırmızı renkte gösteriliyor.

Epoksi Reçineler

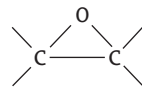
Malzeme bilimlerinde uzun molekül zincirlerine dönüştürülebilen katı veya yüksek akma direncine sahip maddelere reçine denir. Reçineler doğal ya da sentetik kaynaklı olabilir.

Epoksi ifadesi genel olarak oksiran, yani epoksi halkası içeren oldukça geniş bir reaktif bileşik grubunu ifade etmek için kullanılıyor. Üç üyeli epoksi halkası temelde iki karbon atomuna bağlanmış bir oksijen atomundan oluşuyor. Üç üyeli halkadaki gerilimden dolayı oldukça reaktif özellik gösteren bu halka yapısı çoğu kimyasalla kolaylıkla tepkime veriyor. Molekül içerisindeki epoksi grupları ise çoğunlukla molekülün uç kısımlarında yer alıyor. Epoksi reçineler birden fazla epoksit grubu içeren düşük molekül ağırlıklı polimer öncülleri olarak tanımlanıyor. Bu reçineler çeşitli kürlenme maddeleri kullanılarak daha dayanıklı ve oldukça yüksek sıcaklıklarda bozulan termoset malzemelere dönüşüyor.

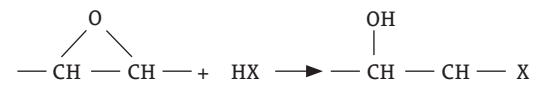
Epoksi reçineler, üstün mekanik özelliklere, yüksek yapışma mukavemetine, iyi ısı direncine ve yüksek elektrik direncine sahip malzemeler olup kaplamalarda, elektronik malzemelerde, yapıştırıcılarda ve fiber takviyeli kompozit malzemelerde yaygın olarak kullanılıyor. Kürlenmiş (yani epoksi reçinedeki zincir moleküller birbirlerine bağlanarak malzemenin üç boyutlu bir ağ yapısına kavuşmuş hâlindeki) reçinelerin özellikleri reçinenin türüne, kürlenme işleminde kullanılan maddeye ve kürlenme sürecine bağlı olarak değişiklik gösterebiliyor. Epoksi reçineler çok basit yapıştırma işlemleri için kullanılabilirdiği gibi bir rüzgâr türbininin pervaneleri veya

bir savaş uçağının parçalarının üretiminde de rol alabiliyor.

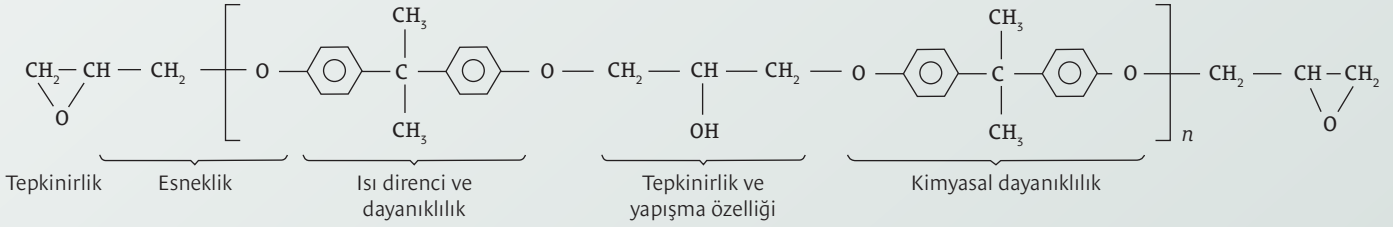
Epoksi reçineler yalnız başlarına kullanılabilirdiği gibi diğer malzeme türleri ile birlikte kullanıldığında da oldukça üstün özelliklere sahip olabiliyor. Bu üstün fiziksel ve kimyasal özellikler de epoksilerin tüm mühendislik alanlarında kullanım bulmasına yol açıyor. Diğer yandan araştırmacılar yeni epoksi türlerini ve diğer malzemelerle kombinasyonlarını araştırma-ya devam ediyor.



Epoksi yani oksiran grubu



Epoksi grubunun asitlerle tepkimesi



Epoksi reçinelerin genel yapısı

Epoksi reçinelerin tepkimeleri molekül zincirinin uzamasına ve/veya zincirler arasında çapraz bağların oluşmasına imkân tanıyor. Epoksi malzemeler çapraz bağlar oluşturduğunda tepkime sonucu ortamdan su molekülü gibi küçük moleküller uzaklaşmadığı için malzeme-deki büzülme çoğu termoplastiğe göre oldukça düşük oranda gerçekleşiyor.

Epoksi reçine moleküllerin geri kalan kısımları düz zincirler, halka yapılar, farklı atom ve gruplar içerebiliyor. Bu nedenle epoksi reçine türlerinin oldukça geniş bir yelpazede olduğu söylenebilir.

Epoksi reçinesi terimi hem polimerleşme öncüsü gruplara hem de çapraz bağlanmanın gerçekleştiği kürlenmiş malzemeye deniliyor. İlkinde reaktif epoksi grupları mevcutken, kürlenmiş reçinede bu grupların hepsi tepkimeye girmiş olabilir. Ancak kürlenmiş reçineler artık epoksi grubu içermeseler de epoksi reçinesi olarak anılıyor.

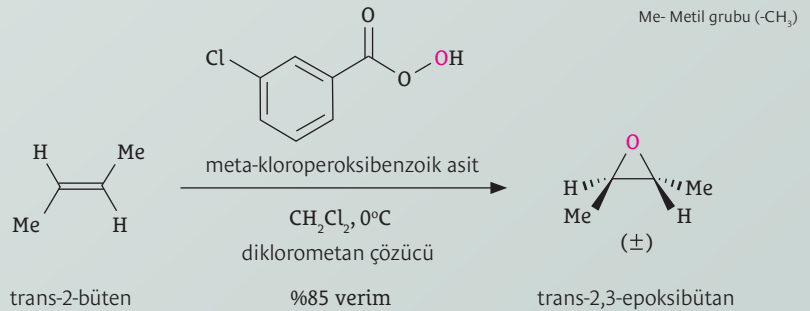
Epoksi reçinelerin genel formülü aynı zamanda doğrusal bir polimer zinciri olarak da ifade edilebi-

lidir. Genellikle uç bölgelerde epoksi grupları bulunurken düzenli aralıklarla ikincil hidroksil grupları mevcuttur. Epoksi molekülünde ikincil hidroksil ve epoksi grupları oldukça tepkinir özelliktedir. Epoksi reçinelerin kuvvetli yapıştırma özellikleri bu ikincil hidroksil gruplarından kaynaklanıyor. Moleküldeki aromatik halka yapıları epoksi reçinelerin omurgasını meydana getirerek reçinelerin yüksek kimyasal ve ısı direncinin temelini oluşturuyor.

Epoksi reçineler kürlenme işlemi esnasında düşük büzülme oranına sahiptir ve bu işlem sırasında, su ve benzeri gibi herhangi bir küçük molekül ürün olarak ortaya çıkmadığı için kürlenme düşük basınç altında gerçekleştirilebilir.

Dünden Bugüne Epoksiler

Epoksi reçinelerin (Avrupa'da epoksit olarak da adlandırılır) 1909'da Rus kimyager Nikolai Alexandrovich Prileschajew (1877-1944) tarafından keşfedildiği kabul ediliyor. Düşük molekül ağırlığına sahip polimer öncüsü olan epoksi reçinesini elde etmek için trans-2-büten ve meta-kloroperoksibenzoik asit kullanan Prileschajew, kimyasal tepkime sonucunda trans-2,3-epoksibütan elde ettiğini bildirdi. Prileschajew epoksidasyonu olarak anılan alken ve peroksi asit tepkimeleri ile birlikte sayısız kullanıma sahip epoksi reçinelerin yolculuğu da böylece başlamış oldu.



Prileschajew epoksidasyon tepkimesi

1934 yılında I.G. Farbenindustrie AG'den Alman araştırmacı Paul Schlack bisfenol-A ve epiklorohidrin bazlı epoksi de dâhil olmak üzere aminlerin epoksilerle olan tepkime ürünlerinin hazırlanmasına dair patent başvurusunda bulundu. Ancak epoksi reçinelerin ticari olarak değer bulması birkaç yıl sonra İsviçre'de bulunan De Trey Freres ve ABD'de bulunan DeVoe-Reynolds şirketlerinde birbirinden bağımsız olarak hemen hemen aynı zamanlarda gerçekleşti.

Ticari anlamda kabul gören ilk epoksi reçineleri birbirinden bağımsız çalışan iki bilim insanı tarafından keşfedildi. Bisfenol-A ve epiklorohidrin kimyasal bileşikler kullanılarak elde edilen epoksi reçinesi aynı zamanda günümüzde de en yaygın kullanılan bisfenol-A diğlisidil eter (DGEBA) tabanlı reçinelerdir. İsviçre'den Dr. Pierre Castan ve Amerika Birleşik Devletleri'nden Dr. Sylvan O. Greenlee tarafından ayrı ayrı patentlenen çalışmalar epoksi reçinelere olan ticari ilgiyi de artırdı.

1936'da De Trey Freres şirketinden Dr. Pierre Castan bisfenol-A ve epiklorohidrin kullanarak düşük sıcaklıkta eriyebilen ve ftalik anhidrit kullanarak termoset hâline getirilebilen epoksi reçinesi üretti. Bu reçinenin diş protezlerinde ve dişçilik uygulamalarında kullanılması öngörüldüyse de pazarlama girişimleri istenen başarıya ulaşamadı. Patentlerin Ciba AG'ye lisanslanmasından sonra 1946 yılında ilk epoksi yapıştırıcı İsviçre Endüstri

Fuarı'nda tanıtıldı ve döküm reçine örnekleri elektrik endüstrisinin dikkatine sunuldu.

II. Dünya Savaşı'ndan önce epoksi reçinelerin bileşenlerinin yaygın olarak üretilmemesinden kaynaklanan yüksek maliyetleri nedeniyle bu ürünlerin ticari önemi tam olarak ortaya çıkmadı. O zamanlar Shell şirketi epiklorohidrinin tek tedarikçisiydi ve Bakelite firması da fenolik reçineler ve bisfenol-A için lider üretici konumundaydı. Daha sonra çeşitli kimya şirketleri tarafından geliştirilen üretim yöntemleri, polimerleştirme teknikleri ve yapılan lisans anlaşmaları ile bu sorun büyük ölçüde aşıldı.

II. Dünya Savaşı'nın hemen ardından Dr. Sylvan O. Greenlee kaplama uygulamalarında kullanılmak üzere bir dizi yüksek molekül ağırlıklı epoksi reçine bileşiminin patentini aldı. Koruyucu yüzey kaplamaları epoksilerin ilk büyük ticari uygulaması olarak kayda geçti ve günümüzde de aynı eğilimin devam ettiğini söylemek mümkün.

1960'larda yüksek sıcaklık uygulamaları için çok işlevli epoksi reçineler geliştirildi. 1970'lerde ise kaplama teknolojisindeki gelişmeler epoksilerin pazar payındaki büyümesini hızlandırdı. Yapısal kompozit endüstrisindeki gelişmelerle zorlu uygulamalarda kullanım bulan yüksek per-

Epoksi Reçinelerin Özellikleri



formanslı epoksi reçineler, 1980'lerde havacılık ve savunma sanayilerinde, özellikle de elektronik ve bilgisayar endüstrilerinde kullanılarak gelişime öncülük etti.

Sahip oldukları olağanüstü özellikler nedeniyle farklı alanlarda sayısız uygulamaya sahip olan epoksi reçineler üzerine çalışmalar aralıksız bir şekilde sürdürüldü. Araştırmacıların epoksi reçinelerle daha yapılacak çok işleri olduğu rahatlıkla söylenebilir.

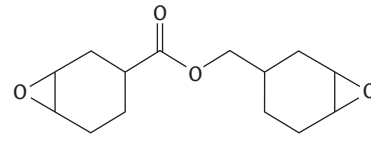
Epoksi Reçinelerin Sentezi ve Bazı Çalışmalar

Bisfenol-A epoksi reçineleri bazik katalizör eşliğinde epiklorohidrinin bisfenol-A ile tepkimesinden elde ediliyor. Reçinenin özellikleri tekrar eden birimlerin sayısına yani zincir uzunluğuna göre değişiklik gösteriyor. Dü-

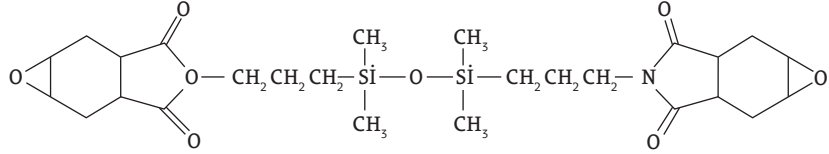
şük molekül ağırlığına sahip reçineler daha akışkan yapıdayken yüksek molekül ağırlıklı reçineler daha kıvamlı veya katı olma eğilimi gösteriyor.

Epoksi reçinelerle ilgili sürekli olarak yeni bilimsel çalışmalar yapılıyor. Bazı önemli çalışmalar sayılacak olursa; Yang ve arkadaşları polietilen glikol ile DGEBA epoksi reçinesinin tepkimesi sayesinde oldukça akışkan özellikte bir epoksi reçinesi sentezlediler. Bu reçine UV ışığı altında uygun kürleyici mad-

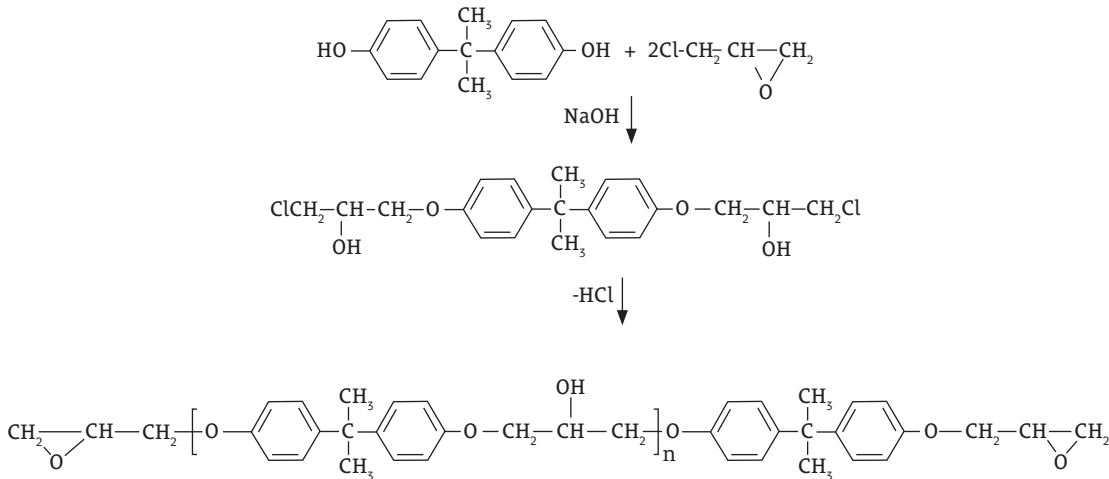
de kullanılarak 40 saniye gibi kısa süre içerisinde neredeyse tamamen sertleştirilebiliyordu. Bir başka bilim insanı Czub, doğal yağlar ve bisfenol-A veya bisfenol-A bazlı epoksi reçineleri kullanarak yüksek molekül ağırlığına sahip kıvamlı epoksi reçineler sentezledi. Wu ve arkadaşları ise bambu ve bisfenol-A kullanarak iki adımda kopolimer epoksi reçinesi sentezlemeyi başardılar. Kürleme işlemiyse trietilen tetramin eşliğinde oda sıcaklığında gerçekleştirilebiliyordu.



Sikloalifatik epoksi yapısı



BISE'nin kimyasal yapısı



Bisfenol-A diglisidil eter (DGEBA) sentezi
DGEBA reçineleri ticari anlamda en çok kullanılan epoksi reçinelerdir.

Bir başka tür olan sikloalifatik epoksi reçineler tamamen doymuş alifatik bir omurgaya sahipler. Böylece UV ışınlarına ve farklı hava koşullarına çok dayanıklı, iyi bir termal kararlılığa ve mükemmel elektiriksel özelliklere sahip bir malzeme elde edilebiliyor. Tüm bu özellikler, yüksek sıcaklığa sahip ortamlarda uygulama gerektiren yapısal bileşenleri imal ederken kullanılan reçineler için son derece önemli olarak değerlendiriliyor.

Tao ve arkadaşları siloksan içeren sikloalifatik epoksi ve imid halkası kullanarak iki aşamalı bir prosedürle kısa adı BISE olan reçineyi sentezlediler. Böylece termal kararlılığı artırmayı başardılar. Gao ve arkadaşları ise opto-elektronik cihazların kaplamasında kullanılabilir saydam sikloalifatik epoksi-silikon reçinesi sentezlediler. Kürlenmiş reçineler daha iyi termal kararlılığa, daha düşük nem tutuculuğuna ve daha yüksek UV ve termal dirence sahipti.

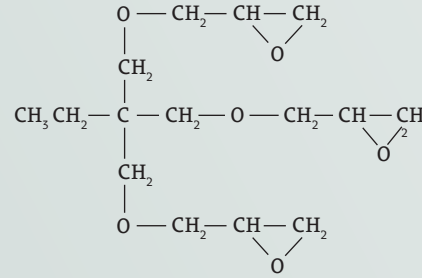
Tüm bu epoksi reçinelerinin yanında üç fonksiyonlu ve dört fonksiyonlu reçineler, Novolak epoksi reçineleri, biyo-bazlı epoksi reçineleri ve flor / fosfor / silikon içeren epoksi reçineleri gibi çok farklı türler de bulunuyor. Farklı reçineler kullanıldığında nihai malzeme özellikleri de kullanılan reçinenin türüne bağlı olarak değişiklik gösteriyor.

Kürleme nedir, nasıl yapılır?

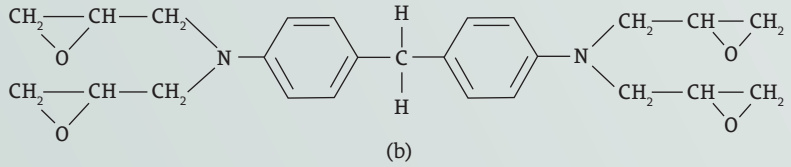
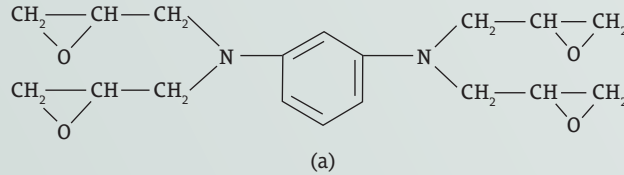
Kürleme, polimer kimyası ve malzeme bilimlerinde polimer zincirlerinin birbirleriyle çapraz bağlanmasını sağlayan ve böylece malzemenin katı, sert ve tok bir

hâle gelmesini sağlayan kimyasal işleme deniyor. Sonuçta moleküller arasında üç boyutlu bir ağ yapısı elde ediliyor.

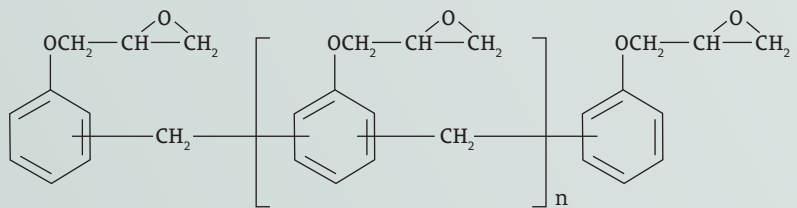
Epoksi reçineleri için kürleme sistemleri, epoksit gruplarının yüksek oranda çapraz bağlı üç boyutlu bir ağ oluşturmasını sağlamak için uygun kimyasal maddeler kullanılarak gerçekleştirilen tepkimeleri içeriyor.



Üç fonksiyonlu epoksi reçinesi



Dört Fonksiyonlu epoksi reçineleri



Novolak epoksi reçinesinin kimyasal yapısı

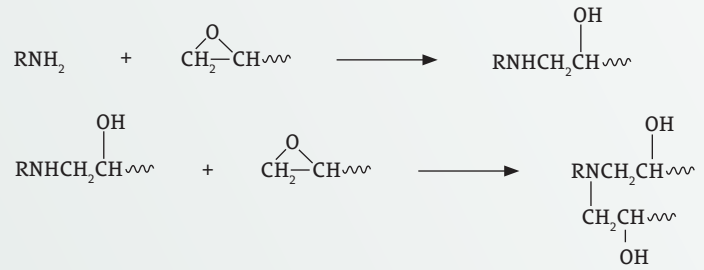


Kürleme işlemi, tepkime türüne bağlı olarak bazı durumlarda oda sıcaklığında gerçekleştirilebildiği gibi, daha yüksek sıcaklıklar uygulanarak veya ışık kullanılarak da yapılabilir. Oda sıcaklığında gerçekleştirilen kürleme işlemleri malzeme daha fazla esneklik, darbe dayanımı ile elektrik ve termal şok direnci sağlıyor. Isıl kürleme ise genel olarak iki aşamada yapılıyor. Düşük sıcaklıklarda bir ön kürleme aşamasını takip eden daha yüksek sıcaklık uygulaması nihai sertleşmenin gerçekleşmesini sağlıyor. Epoksi reçinelerin kürleme tepkimeleri kızılötesi ve UV ışınları kullanılarak da aktif hâle getirilebiliyor. Bu yöntem diğer tüm kürleme yöntemlerine göre sertleştirme işlemini oldukça kısa sürelerle indirmesi bakımından ön plana çıkıyor. Ayrıca daha kontrollü bir kürleme sürecine de olanak sağlıyor.

Kürleme işleminde farklı kimyasallar kullanılabilir. Aminler, alkali kürleme maddeleri, anhidritler ve katalitik kürleme maddeleri ön de gelenler arasında sayılabilir. Bu maddeler reçinenin kürleme reaksiyonunu destekleyip aynı zamanda reaksiyonun kontrollü bir şekilde gerçekleşmesini sağlıyor. Bununla birlikte, kürleme işlemi için eklenen madde reçinede geri dönüşü olmayan değişikliklere yol açıyor. Reçinelerin kürleme mekanizmaları ve malzemenin son özellikleri kullanılan maddenin moleküler yapısına bağlı olarak değişiklik gösteriyor.



Epoksi reçineler aynı zamanda dekoratif ve sanatsal ürünlere de dönüşebiliyorlar.



Amin ve epoksinin kürleşme tepkime mekanizması

Oldukça yaygın kullanıma sahip amin türü kürleme maddeleri, epoksi reçinelerdeki epoksit halkaları ile tepkimeye girerek malzemenin oldukça sert ve tok bir hâle gelmesini sağlar.

Alkali (bazik) kürleme maddeleri imidazoller ve üçüncül aminler olarak ayrılıyor. Bu maddeler tek başlarına kürleme maddesi olabildikleri gibi epoksi ve kürleme maddeleri arasındaki tepkimeleri hızlandırıcı olarak da kullanılabilirler. Oda sıcaklığında bozulmadan uzun süre kalabilmeleri bu maddelerin önemli avantajları arasında sayılıyor.

Genel olarak oldukça iyi sayılabilecek kimyasal, fiziksel ve elektrik-

sel özelliklere sahip anhidrit kürleme maddeleri ise oldukça uzun raf ömrüne sahiptir ve bunların kürleme tepkimeleri aminler kullanılarak katalizleniyor.

Katalitik kürleme maddeleri ise normal koşullar altında aktif değildir ancak ısı veya ışık gibi harici bir uyarı ile aktivite gösterirler. Kürleme işlemi katalitik kürleme maddesi tarafından başlatılan polimerleşme tepkimesi ile devam eder. Benzilsülfonyum, benzilpiridinyum, benzilamoniyum ve fosfonyum tuzları bu maddeler arasında sayılabilir. Katalitik kürleme maddelerinin kullanımı epoksi reçinelerinin kararlı yapısını korumasına yardımcı olur ve bu maddelerin kolay uygulanabilmesini sağlar.

Daha Üstün Özellikler İçin Epoksi Bazlı Kompozitler

Epoksi reçineler kürleme işlemine tabi tutulduğunda molekül zincirleri arasında yüksek oranda çapraz bağlar oluşur. Bu nedenle sert ve kırılğan bir yapıya sahip olurlar, çatlak başlamasına ve büyümesine karşı düşük dirence sahip olabilirler. Yapısal malzemelerde kullanımı sınırlayan bu olumsuz yönler çeşitli sertleştirici ve güçlendirici malzemeler kullanılarak aşılabılır.

Epoksi reçinelerle termoplastik malzemelerin bir arada kullanıldığı kompozit malzemeler daha tok bir yapıya sahip oluyorlar. Poliimidler, polisülfonlar, polieter ketonlar ve çeşitli kopolimerler epoksi reçinlere eklenerek ürün özellikleri geliştirilebiliyor.

Kırılğanlığa karşı dayanımı artırmak içinse reçinelere inorganik parçacıklar eklenebiliyor. Eklenen bu inorganik bileşenler sayesinde de-

formasyonlara, çatlak oluşumuna ve çatlak büyümesine karşı dirençli son malzemeler elde edilebiliyor.

Epoksilerin karbon fiberlerle birlikte kullanıldığı kompozitler de yük dağılımını iyileştirerek malzemenin yüklere karşı olan direncini artırıyor. Yük altında karbon fiberlerin epoksi reçinesinden koparak ayrılmasını engellemek için fiberler önce polimerik çözelti ile kaplanıyor ve bu sayede tam bir yapışma sağlanıyor. Epoksi/karbon fiber kompozitleri sahip oldukları yüksek mukavemet nedeniyle genel olarak yapısal uygulamalarda kullanım buluyor.

Nanoteknolojiler ve Epoksi

Kritik uygulamalarda kullanılmak üzere üstün özellikler taşıyan malzemelerin geliştirilmesi rekabetçi sektörlerde büyük önem taşıyor. Epoksi sistemleri taşıdıkları büyük potansiyel dolayısıyla yapılan araştırmalarda kilit rol oynuyor. Yeni teknolojilerle geliştirilmiş epoksi bazlı malzemeler tasarlamak mümkün oluyor.

Nano boyutlarda dolgu malzeme içerikli epoksi reçineler kara, hava, deniz ve uzay taşıtlarında yüksek performanslı yapıstırıcılar ve kaplama malzemeleri olarak kullanılıyor. Epoksilerde iletkenliği sağlamak için karbon nanotüpler, grafen, karbon siyahı, silika, baryum titanat ve kalsiyum bakır titanat gibi nanopar-

tiküller ekleniyor. Geliştirilen sistemler elektronik parçaların kaplama ve ambalajlamasında da kullanım buluyor.

Epoksi/kil nanokompozitlerinde düşük kil derişimleri kullanıldığında mekanik dayanım ve termal kararlılık gibi bazı özellikler önemli ölçüde iyileşme gösteriyor. Kalıplama, döküm işleri ve genel olarak inşaat sektöründe uygulama bulan nanokil ile geliştirilmiş epoksi sistemleri, karbon elyaf veya cam elyaf ile takviye edildiğinde otomobil ve havacılık endüstrilerinde kendilerine yer buluyorlar. Olağanüstü sayılabilecek mekanik, elektronik ve termal özelliklere sahip karbon nanotüplerin epoksi reçinelerinde dolgu malzemesi olarak kullanılması da malzeme özelliklerinin iyileştirilmesine imkân sağlıyor.

Epoksi bazlı nano malzemeler biyomedikal uygulamalar için de çok önemli olarak görülüyor. Epoksi/nano elmas kompozitleri biyotıp alanında kullanılıyor. Ayrıca nano yapıtlı epoksi malzemeler kemik onarımındaki performanslarıyla da dikkat çekiyor.

Şimdiye kadar çok sayıda epoksi nano kompozit boya ve kaplama malzemesi geliştirildi ve ticarileşti. Tüm bunlarla birlikte yapılan araştırmalar sonucunda kendi kendini iyileştiren, mikrodalga soğurucu özelliğe sahip ve ısıl dayanımı yüksek epoksi nano kompozitler elde edildiği de bildiriliyor.



Boyalar ve yüzey kaplamaları

Epoksi reçineler kolay ve güvenli bir şekilde uygulanabilmeleri, kimyasallara ve aşınmaya karşı yüksek dirençli olmaları, ileri derecede mekanik dayanıma ve mükemmel derecede yapışma özelliklerine sahip olmaları nedeniyle zor koşullara dayanabilecek boyama ve kaplama işlerinde yaygın olarak kullanılıyorlar. Epoksi boya ve yüzey kaplama uygulamaları %50'lik oranla en yüksek pazar payına sahip.

Özellikle çelik yapılarda aşınma ve paslanmaya karşı koruma sağlayan epoksi kaplamalar denizcilik başta olmak üzere pek çok farklı sektörde uygulama buluyorlar. Örneğin, asitli yiyecekleri saklamak için kullanılan metal kutu ve kaplar aşınma ve paslanmayı önlemek için epoksi reçinelerle kaplanıyor. Ayrıca yüksek performansla sahip ve aynı zamanda dekoratif olan zemin kaplamaları da epoksiler kullanılarak tasarlanabiliyor.

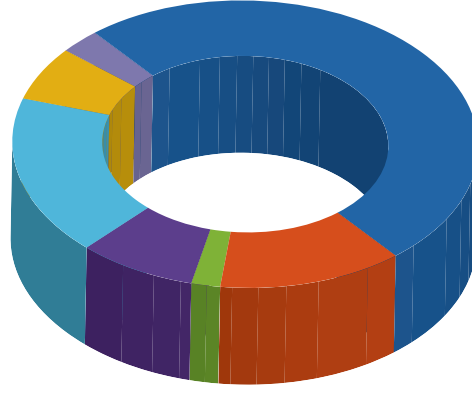
Yapıştırıcılar

Epoksi bazlı yapıştırıcılar metaller, polimerik kompozit malzemeler ve beton yapılar da dâhil olmak üzere farklı türdeki malzemeleri birleştirmek için giderek daha fazla kullanılıyor.

Çeşitli kürlenme mekanizmalarıyla



Nerelerde Kullanılıyor?



- Boya ve Kaplama %50
- İnşaat %13
- Elektrik %2
- Elektronik %8
- Kompozit %18
- Yapıştırıcı/Kalıp %6
- Diğer %3

Farklı Sektörlerdeki Epoksi Reçine Kullanımı

rı ile kimyasal ve fiziksel dış etkilere karşı oldukça dayanıklı hâle gelen bu yapıştırıcılar, otomotiv, uzay ve havacılık, elektronik, inşaat, spor ve ambalaj endüstrilerinde geleneksel yapıştırıcıların yerini almaya devam ediyor.

Yapısal yapıştırıcılar sınıfının en önemli üyelerinden birisi sayılan epoksiler uçak, otomobil, bisiklet, tekne, kayak, kar kayağı ve daha pek çok son ürün için yüksek mukavemetli yapışmanın gerekli olduğu tüm uygulamalarda oldukça kullanışlı olup amaca mükemmel şekilde hizmet ediyor. Epoksi yapıştırıcıların mukavemetini artırmak ve zemin/yapıştırıcı ara yüzündeki kimyasal bağlanmayı etkinleştirmek için genel olarak daha yüksek sıcaklıklar kullanılıyor.

Son zamanlarda epoksi yapıştırıcılarda optimum kürlenme koşullarının iyileştirilmesi, malzemenin yüksek sıcaklıklara, ısl döngülere, değişken yükler ve titreşimlere karşı dayanımının artırılması gibi özelliklere ihtiyaç

duyulmuştur. Bu nedenle epoksiler takviye edici dolgu malzemelerinin kullanılmasıyla kompozit malzemeler olarak üretilmeye başladılar. Kullanılan dolgu malzemelerinin boyutları da mikro ölçeklerden nano boyutlara doğru küçüldü. Araştırmalar sonucunda geliştirilen yeni epoksi bazlı kompozit yapıştırıcılar gün geçtikçe daha da işlevsel hâle geliyor.

Endüstriyel İşlemler

Epoksi sistemleri endüstriyel sektörlerde kalıplar, modeller, levhalar, dökümler ve endüstriyel parçalar gibi pek çok iş ve işlemde kullanım buluyor. Epoksi sistemler kullanım bakımından metal, ahşap ve diğer geleneksel malzemeler ile karşılaştırıldığında, işlem verimliliğini artırma ve kolay uygulama gibi özellikleriyle ön plana çıkıyor. Sonuç olarak maliyetler düşüyor ve ürün teslim süreleri de kısalıyor.

Araştırmalar elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin metalik bileşenli silindirik boruları onarmada son derece etkili olduğunu gösteriyor. Epoksi kompozitler ayrıca hidrojen depolama tüplerinde de yük taşıyıcı olarak önemli işlevselliğe sahiptir.

Havacılık ve Uzay Endüstrisi



Epoksi reçineler, yüksek yapışma özellikleri ve düşük maliyetleri nedeniyle havacılık ve uzay endüstrisinde yapısal yapıştırıcı uygulamalarında, kaplamalarda ve amaca özel parçaların imalatında yaygın olarak kullanılıyor. Yüksek mukavemetli cam, karbon, Kevlar ve bor elyafla güçlendirilmiş epoksi reçineler, bu alanlarda en fazla kullanım potansiyeline sahip malzemeler olarak dikkat çekiyor.

Elektrik ve Elektronik

Epoksi reçine formülasyonları motor, jeneratör, transformatör, anahtarlama tertibatı ve izolatörlerde yaygın olarak kullanılıyor. Epoksi reçineler çok iyi derecede elektrik izolasyonu sağlıyorlar ve elektrik bileşenlerini kısa devre, toz ve nem gibi olumsuz etmenlere karşı en üst düzeyde koruyorlar.

Metal dolgulu epoksi sistemler elektromanyetik parazitlere karşı koruma sağlıyor. Ayrıca entegre devre cihazlarını nem, hareketli iyon kirleticiler, sıcaklık ve radyasyon gibi etkilerin yanında mekanik ve fiziksel hasarlara karşı da koruyorlar. İnorganik parçacıklar içeren epoksi kompozitler ise elektrik ve elektronik bileşenlerin kapsülleme ve kaplamasında kullanılıyor.

İnşaat

Epoksi reçine bazlı malzemelerin döşeme ve yol kaplamalarında kullanımı son yıllarda artış gösteriyor. Kimyasallara ve aşınmaya karşı oldukça dirençli olan malzemeler ciddi aşınmanın yaşanabileceği ve yoğunluktan dolayı yol bakım ve onarım çalışmalarının asgari düzeyde tutulması amaçlanan yoğun kavşak ve döner kavşaklarda kullanılıyor. Epoksi reçineler uçak pistleri ve deniz duvarları gibi onarımın hızlı gerçekleşmesi istenen alanlarda da polimerik beton onarım malzemelerinin temelini oluşturuyor.

Yenilenebilir Enerji

Yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemle-



rinden sayılan rüzgâr enerjisinin hasadı için rüzgâr türbinlerinin yapımında kullanılan kompozit malzemelerin temelini epoksi reçineler oluşturuyor. Cam-epoksi kompozitleri maliyetleri düşük olduğundan daha fazla kullanım buluyor. Karbon-epoksi kompozitleri ise mekanik mukavemetlerinin yüksek olması nedeniyle daha uzun kanatlı sistemlerin direk kapaklarında kullanılıyor. Kompozitlerin rüzgâr türbini uygulamalarında kullanımı her yıl %20'den fazla artış gösteriyor. Sonuç olarak rüzgâr enerjisi hasadında epoksi bazlı sistemler her geçen gün daha fazla tercih ediliyor.

Biyomedikal sistemler

Biyomedikal uygulamalarda da epoksi reçineler yaygın kullanıma sahipler. Klinik olarak yara kaplamaları, yapay damarlar, kalp kapakçıkları ve şekil hafızalı polimerik köpükler başarıyla uygulanıyor.

Ayrıca nanoelmas/epoksi türevleri, aşırı derecede sert olmaları, kimyasallarla tepkime vermeye karşı çok dirençli olmaları, düşük elektriksel iletkenliğe ve yüksek ısı iletkenliğine sahip olmaları ve optik olarak saydamlıkları gibi benzersiz özellikleri nedeniyle biyomedikal sistemlerde geniş kullanım potansiyeli taşıyorlar.

Biyo Bazlı Epoksi Termosetler

Günümüzde epoksi termosetlerin yaklaşık %90'ı epiklorohidrin ile bisfenol-A'nın sodyum hidroksit varlığında tepkimesinden elde edilen bisfenol-A diglisidil eteri türü epoksi monomerlerinden elde ediliyor. Epoksi üretiminin neredeyse tamamına yakınınun fosil kaynaklara bağlı olması sera gazları emisyonunu sınırlamak için uygun gözüküyor.

Bu doğrultuda petrol bazlı epoksi sistemlerinin yerini alması amacıyla bitkisel yağlar, furan, tanin, lignin, rosin, vanilin, daidzein ve itakonik asit gibi yenilenebilir kaynaklardan biyo bazlı epoksi termosetler geliştirmek için araştırmalar gerçekleştiriliyor.

Elde edilen biyo bazlı epoksiler petrol bazlı muadilleriyle karşılaştırılabilir özellikler gösteriyorlar ve çevre dostu olmaları nedeniyle ön plana çıkıyorlar. Tüm epoksiler gibi yüksek yanıcılık gösteren biyo bazlı epoksilerin de yanmaya karşı dayanıklı olmalarını sağlamak gerekiyor.

Genel olarak yanmaya karşı dayanıklılık iki yolla sağlanıyor. Bunların ilkinde yüksek miktarda yanma geciktirici dolgu maddesi sisteme ekleniyor ve fiziksel olarak epoksi sistemle karıştırılıyor. Bu yolda kullanılan katkı maddeleri insana zararlı olabileceği gibi elde edilen epoksi malzemenin üstün fiziksel ve kimyasal özelliklerinin bozulmasına da yol açabiliyor. Diğer yöntemdeyse alev geciktirici özellik taşıyan monomerler epoksi sistemlere kimyasal olarak bağlanıyor. Böylece elde edilen epoksi sistemi kendiliğinden yanmaya karşı dayanıklı hâle geliyor.

Yapılan çalışmalarda yanmaya dayanıklı farklı tür biyo bazlı epoksi termosetler elde edildiği bildirilmiştir. Ancak elde edilen malzemelerin mekanik dayanımının fosil bazlı muadillere göre daha düşük olması ve yüksek üretim maliyetleri gibi sorunlar biyo bazlı epoksi termosetlerin ticarileştirilmesinin önünde şimdilik engel oluşturuyor. Bilim insanları yüksek performanslı ve düşük maliyetli biyo bazlı epoksilerin elde edilmesine yönelik araştırmalarına devam ediyorlar.

Epoksilerin Pazar Payı

Business Communications Company (BCC) raporuna göre küresel ölçekte epoksi termosetlerin pazar payı 2015 yılında 7 milyar \$'a ulaşmıştı. Yaklaşık olarak yıllık %6,3 büyümeye oranı dikkate alındığında 2021 yılında epoksi termosetlerin pazar payının 10,2 milyar \$'a ulaşması bekleniyor.

Kürlenmiş epoksi reçinelerin özellikleri reçinenin türüne, kürlenme tekniğine ve kürlenme işleminde kullanılan maddeye bağlı olarak değişebiliyor. Yapılan çalışmalardan da anlaşıldığı gibi bu reçinelerin son özellikleri termoplastik bileşenler, inorganik maddeler, karbon lifleri, kil ve karbon nanotüpler eklenerek geliştirilebiliyor. Bu sayede epoksi reçinelerin kullanım alanlarına her gün yenileri ekleniyor ve epoksiler malzeme teknolojilerindeki önemini korumaya devam ediyor. ■

Kaynaklar

- Singh, N.P., Gupta, V.K., Singh, A.P., "Graphene and carbon nanotube reinforced epoxy nanocomposites: A review", *Polymer*, 180, 121724, 2019.
- Jin, F.L., Li, X., Park, S.J., "Synthesis and application of epoxy resins: A review", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 29, 1-11, 2015.
- Ahmadi, Z., "Nanostructured epoxy adhesives: A review", *Progress in Organic Coatings*, 135, 449-453, 2019.
- Ahmadi, Z., "Epoxy in nanotechnology: A short review", *Progress in Organic Coatings*, 132, 445-448, 2019.
- Wang, X., Guo, W., Song, L., Hu, Y., "Intrinsically flame retardant bio-based epoxy thermosets: A review", *Composites, Part B*, 179, 107487, 2019.
- Gibson, G., *Brydson's Plastics Materials*, 8th edition, Editor: Marianne Gilbert, Elsevier Ltd., 2017.
- Kumar, S., Samal, S.K., ve ark., "Recent Development of Biobased Epoxy Resins: A Review", *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 57, 3, 133-155, 2018.
- Pham, Ha.Q., Marks, J.M., *Epoxy Resins*, *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2012.