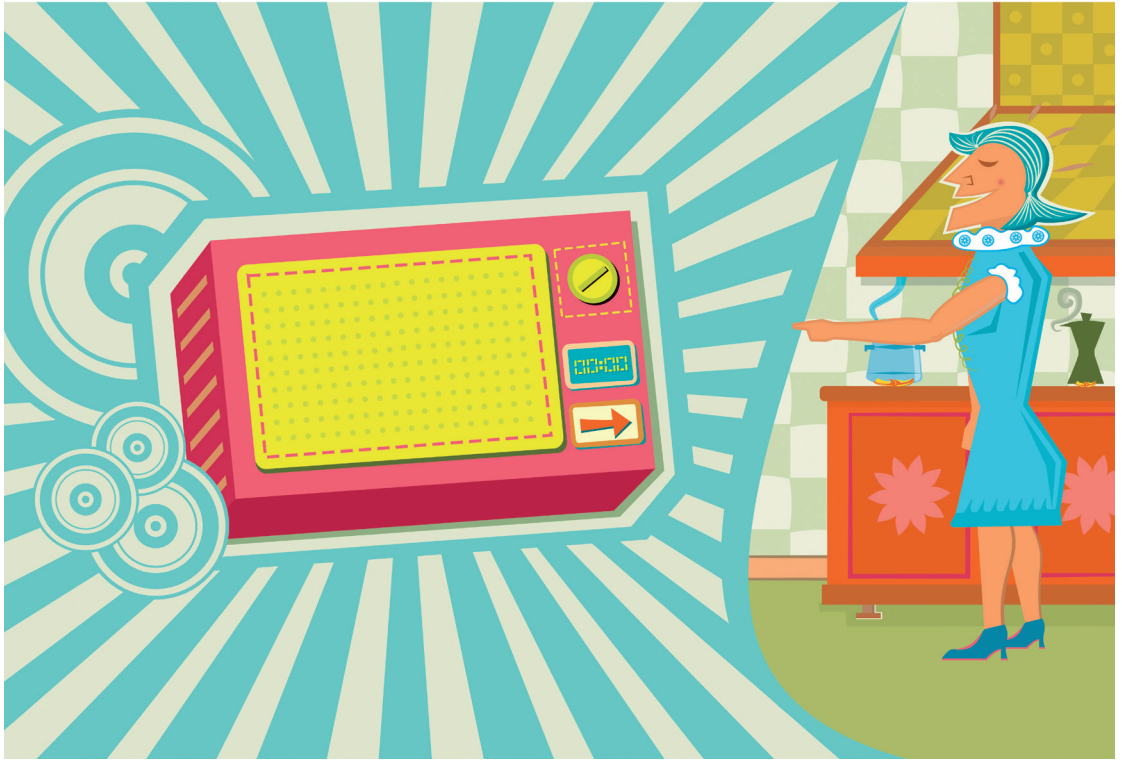


Mikrodalgalar ve Uygulamaları

Mikrodalga bilimi ve teknolojisi, son 50 yılın en önemli buluşlarından biri olarak değerlendiriliyor. Mikrodalga ile pişirme 1960'lı yıllardan beri gıda alanında kullanılıyor, ancak son 10 yıldır mikrodalgaların çok sayıda endüstri alanında ve laboratuvarlarda kullanımı da giderek yaygınlaşıyor.



Mikrodalga teknolojisinin gelişimi II. Dünya Savaşı sırasında radar cihazlarının sa-bit frekansta mikrodalga üretmesi için yapılan çalışmalar ile başlamıştır. Percy LeBaron Spencer radar dalgaları ile deney yaparken cebindeki çikolatanın erimesi ile mikrodalga enerjisinin yiyecekleri ısıtabildiğini keşfetti. Ardından mikrodalgaların besinlerin pişirilmesi amacıyla kullanılması fikrini ortaya attı ve yaklaşık 2 metre yükseklikte ve 350 kg ağır-

lıktaki ilk mikrodalga fırını tasarladı. Günümüzdeki-lerle karşılaştırıldığında “dev” büyüklükte olan bu fırın, hantal oluşunun yanı sıra fiyatının yüksek olması nedeniyle de piyasada ilgi görmedi. Bugün evlerimizde giderek yaygın bir şekilde kullanılmakta olan mikrodalga fırınlar 1954 yılında piyasaya sürüldü. Bir yandan bu fırınlar geliştirilirken, 1980’lerde de laboratuvarlarda kullanılmak için tasarlanmış endüstriyel mikrodalga fırınlar üretilmeye başlandı.

Mikrodalgaların Özellikleri

Mikrodalga ışıma, tüm elektromanyetik ışımalarda olduğu gibi, manyetik ve elektrik alan olmak üzere iki bileşenden oluşur. Elektromanyetik spektrumun radyo dalgaları ile kızıl ötesi ışınlar arasındaki bölümünde yer alan mikrodalgalar ışık hızında hareket eder. Frekansları 0,3 ile 300 GHz arasında, dalga boyları ise 1 mm ile 1 m arasındadır. X-ışınlarından, UV ışınlarından ve kızıl ötesi ışınlardan daha düşük frekanslardaki bu enerjiden sadece dönme hareketi yapacak şekilde etkilenen moleküllerin yapısındaki kimyasal bağlar kırılmaz. Ev tipi mikrodalga fırınlar su moleküllerinin çok iyi bir soğurucu olduğu 2,45 GHz'lik frekansta çalışır. Bu frekansta çalışan bir fırının içine koyulan ve mikrodalgayı soğuran bir maddenin molekülleri, saniyede 2,5-3 milyar kez titreşerek kinetik enerji kazanır, böylece madde ısınır ve pişer.

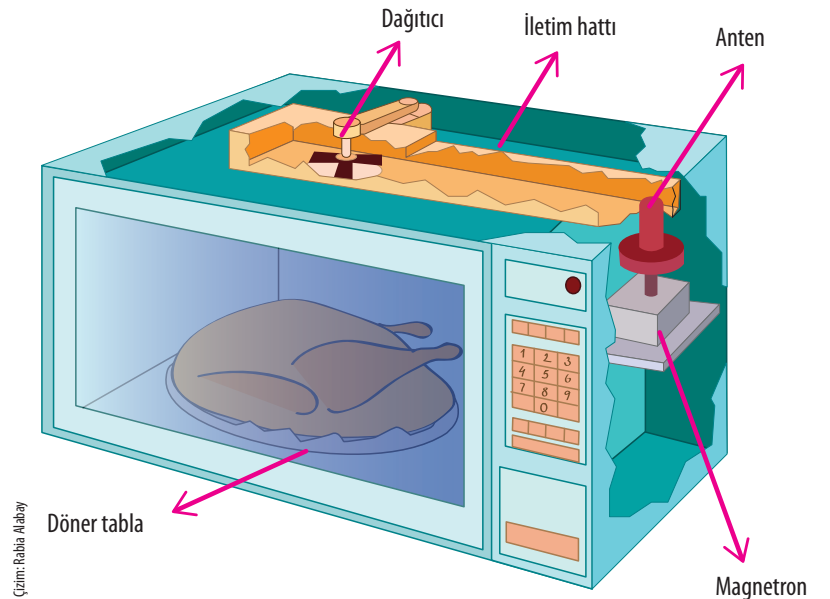
Genel olarak mikrodalga sistemleri mikrodalga kaynağı (jeneratör), mikrodalgayı jeneratörden uygulama bölgesine (aplikatöre) dağıtan iletim hattı ve enerjiyi ısıtılacak malzemeye etkin şekilde aktaran aplikatörden meydana gelir. Magnetronlar laboratuvarlarda, endüstride ve evsel mikrodalga fırınlarda en sık kullanılan jeneratörlerdir; 60 Hz'lik elektrik enerjisini mikrodalgalara dönüştürürler. Magnetronun ürettiği yüksek enerji, küçük bir anten yardımıyla dağıtıcılara aktarılır ve dağıtıcılar bu dalgaları fırın boşluğuna taşır. Taşınan mikrodalgaların fırının içinde homojen olarak dağılmasını sağlamak amacıyla ya bir döner tabla ya da dağıtıcıdan sonra yerleştirilen bir pervane kullanılır. Isınan maddenin yaydığı enerji ile ısınan havanın fırının içinde birikmesini önlemek amacıyla da bir havalandırma sistemi bulunur.

Alternatif bir ısıtma yöntemi olarak mikrodalgalar yalnızca yiyecek ve içeceklerin ısıtılmasında değil laboratuvarlarda pek çok kimyasal tepkimenin gerçekleştirilmesinde de kullanılabilir. Ev tipi mikrodalga fırınların en büyük avantajı ucuz olmaları ve kimyasal sentez için gerekli ekipmanlar (karıştırıcı, kondansatör vb.) ile birleştirilebilmeleridir. Ancak magnetronun açılıp kapatılması ile sisteme uygulanan gücün sürekli değişmesi ve ortam koşullarının (sıcaklık ve basınç) kontrol edilememesi, bilimsel çalışmalar açısından dezavantajdır. Bu nedenle laboratuvarlardaki özel gereksinimleri karşılamak amacıyla ev tipi mikrodalga fırınlardan farklı olarak, özel mikrodalga sistemleri geliştirilmiştir. Bu sistemlerde sıcaklığın ve basıncın kontrol edilebilmesi sayesinde güvenlik ar-

tırılabilir ve tepkimeler tekrarlanabilir. Kimyasal tepkimenin gerçekleştirildiği boşluk, tepkimeler sırasında meydana gelebilecek patlamalara karşı korunma amacıyla özel olarak tasarlanmıştır. Bazı sistemlerde örnekler boşluğa robotik bir kol ile yerleştirilip yine robotik kol ile geri alınır ve tepkimeler otomatik yürütülebilir. Sistemler sürekli akış kangalı, manyetik karıştırıcı ve geri soğutucu gibi çeşitli aksesuarlarla zenginleştirilebilir. Mikrodalga cihazları tekli veya çoklu sistemler olmak üzere iki tipte tasarlanır. Tekli sistem cihazların en büyük avantajı, örneğin mikrodalga ışımasının en yüksek olduğu noktaya yerleştirilmesi ile yüksek ısıtma oranı sağlanmasıdır. Her defasında yalnızca bir örnek için uygulama yapılabilmesi ise bir dezavantajdır. Tekli sistem mikrodalga ısıtma donanımları genellikle az miktarlardaki ilaç sentezinde ve otomasyon alanlarında kullanılır. Çoklu sistem cihazlarda ise amaç mikrodalgayı cihazın içinde olabildiğince dağıtabilmektir. Böylelikle çok sayıda örnek ile aynı zamanda çalışmak mümkün olur. Bu sistemlerin en büyük dezavantajı, dağıtılan ısıtma ile ısıtılan örneklerin verimli şekilde kontrol edilememesi nedeniyle art arda ısıtılan örnekler için aynı ısıtma koşullarının sağlanamamasıdır.

Yukarıda açıklanan teknik gelişmeler, mikrodalga fırınların yeni uygulama alanlarında, özellikle polimer bilimi ve teknolojisinde kullanımını giderek yaygınlaştırmaktadır.

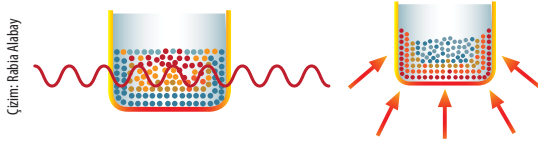
Mikrodalga fırının bileşenleri



Mikrodalgalar bir maddeyi nasıl ısıtır?

Mikrodalgaların maddelerle etkileşimi maddenin türüne bağlı olarak temelde üç şekilde gerçekleşir. Bunlar yansıtma, soğurma ve geçirgenliktir. Eğer malzeme elektriksel iletken (metaller, grafit gibi) ise mikrodalgalar yüzeyden geri yansır ve malzeme ısınmaz. Yüksek yalıtkan özellik gösteren malzemeler kullanıldığında, mikrodalgalar malzeme içerisinden soğurulmadan geçer ve malzeme yine ısınmaz. Elektromanyetik alana maruz kaldıklarında mikrodalgayı soğuran malzemeler (su, şeker, yağ gibi) ise çok ısınır. Mikrodalgayı soğuran malzeme içeren çözeltiler de soğurma derecesine bağlı olarak ısınır. Maddelerin kimyasal veya fiziksel bağları da mikrodalgayı soğurma derecelerini değiştirir.

Mikrodalga ile geleneksel yöntemin ısıtma açısından karşılaştırılması. Mikrodalga ile ısıtma (sol), geleneksel ısıtma (sağ).



Mikrodalgaların soğurulması sonucunda oluşan ısınma iki şekilde gerçekleşir: Dipol etkileşimler ve iyonik iletim. Dipol moment, elektriksel kutuplu moleküllerin kutupları arasındaki elektrik yükünü ifade eder. Dipol momentli malzemeler (örneğin su molekülü) mikrodalgaya maruz kaldıklarında ısı üretir. Mikrodalganın elektrik alanına maruz kalan dipol momentli moleküller, dönme hareketi sonucu uygulanan alanla aynı hizaya gelir. Bu dönme hareketine bağlı olarak ortaya çıkan sürtünme kuvveti sonucunda da moleküller enerji kazanır ve ısınır. İyonik iletim mekanizması, dipol etkileşim mekanizmasından bazı bakımlardan farklıdır. Bir çözelti içindeki iyonlar yüklü parçalar, mikrodalganın elektrik alanından kaynaklanan polarite (zıt iki kutba sahip olma) değişimine bağlı olarak hareket eder ve çarpışır. Bu çarpışma sonucu ortaya çıkan kinetik enerji, ısı enerjisine dönüşür.

Bu iki mekanizmanın etkinliklerini karşılaştırmak için, aynı süreyle aynı güç değerinde mikrodalga uygulanan saf suyun ve musluk suyunun ulaştığı en yüksek sıcaklık değerlerine bakılmıştır. Saf su sadece dipol etkileşimle ısınırken, musluk suyunun (içerdiği iyonlar nedeniyle) hem iyonik iletim mekanizması hem de dipol etkileşim mekanizması etkindir. Dolayısıyla musluk suyunun ısınma hızının ve ulaştığı en yüksek sıcaklığın saf suyunkinden daha yüksek olduğu görülmüştür.

Mikrodalga ile ısıtma işleminin süresi, ısıtılacak maddenin su içeriğine, yoğunluğuna, kütlesine, dielektrik sabitine (elektriksel potansiyel, enerjiyi depolama yeteneği) ve iyon yüküne bağlıdır. Mikrodalga ile ısınmayı bu faktörler dışında mikrodalganın çalışma frekansı, gücü, ısı iletkenlik özellikleri ve özgül ısı gibi başka parametreler de etkiler.

Mikrodalga ile ısıtma geleneksel ısıtmadan farklıdır. Geleneksel ısıtma işleminde ısıtma kabın yüzeyinden başlar, karışımın kendisinden daha yüksek sıcaklıktaki yüzey ile fiziksel etkileşim halinde olması gerekir. Bir tencereye suyun geleneksel yöntemlerle, örneğin doğal gaz ile çalışan bir ocakta ısıtıldığı durumu düşünelim. Isının ocağın tencereye suya aktarılması, ısının tencere çeperinden içerideki suya iletilmesiyle gerçekleşir. Bu yöntemde ısıtma iki ortam arasındaki sıcaklık farkının yanı sıra tencerenin imal edildiği malzemenin iletkenlik özelliklerine de bağlı olduğu için yavaştır ve etkin değildir. Sıcaklık zamanla tencerenin çeperinden merkeze doğru azalır, dolayısıyla homojen bir ısınmadan söz edilemez. Geleneksel yöntemle ısıtmada mekanik karıştırma ile ısının homojen olarak dağılması sağlanmaya çalışılsa da dengeye ulaşılması uzun zaman alır.

Mikrodalga ile ısıtma geleneksel ısıtma yöntemlerinden daha hızlıdır, daha kısa sürede ve daha düzenli ısıtma sağlar. Örneğin mikrodalgalar kimyasal tepkimelerde ısıtma için kullanıldığında karışım içindeki moleküllerle doğrudan etkileşir ve sıcaklık hızla artar. Isıtma işlemi, kabın ısı iletkenliğine ve ortam bileşimine bağlı olmadığı için “ani süper ısınma bölgeleri” meydana gelir ve ısı dağılımı geleneksel ısıtmaya göre çok daha homojen olur. Temas etmeden ısıtma (malzeme yüzeyi daha az ısınır), ısı aktarımı yerine enerji aktarımı (ısıtma malzemeye nüfuz eder), malzeme seçiciliği, hızlı başlama, durdurma ve sonlandırma ve ters ısısal etki (ısınma malzemenin içinden başlar) mikrodalganın diğer üstünlükleridir.

Mikrodalgaların Uygulama Alanları

Mikrodalgaların çeşitli uygulama alanları vardır. Bunlar aşağıda kısaca açıklanmıştır.

Gıda alanında

Gıda endüstrisi mikrodalganın en yaygın kullanıldığı alandır. Günümüzde mikrodalga dondurulmuş ürünlerin çözündürülmesinde, kurutma, kavurma ve pişirme işlemlerinde kullanılmaktadır. Pastörizasyon, sterilizasyon, dondurarak kurutma ve haşlama işlemlerinde, ayrıca küf mantarlarının azaltılmasında da mikrodalganın kullanım olanakları araştırılıyor.

Laboratuvar tipi çeşitli mikrodalga sistemleri



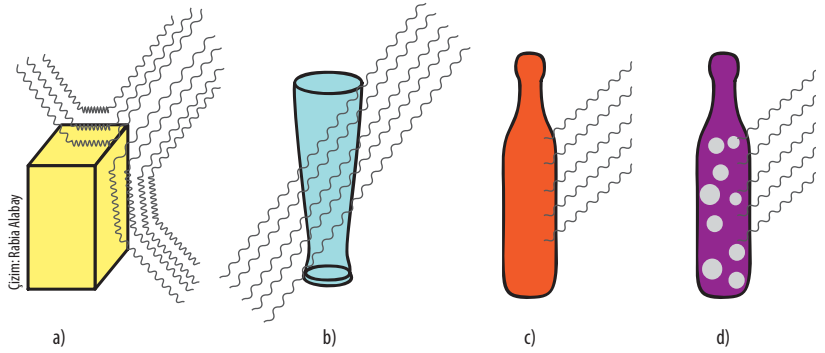
Metallerde

Mikrodalga elyaf kurutulmasında, kereste içindeki kurtçukların yok edilmesinde, orman ürünlerinin kurutulmasında ve kömürün iyileştirilmesinde kullanılıyor.

Biyomedikal uygulamalarda

Mikrodalga biyomedikal uygulamalarda da önemli bir yere sahip. Temel olarak, tıbbi atıkların sterilizasyonunda kullanılıyor. Diş hekimliğinde sterilizasyonda, alçı modellerin kurutulmasında ve akrilik protez kalıplarının oluşturulmasında mikrodalga uygulanıyor. Akrilik reçinelerin su banyosunda polimer oluşturması ile mikrodalga koşullarında polimer oluşturması karşılaştırıldığında, mikrodalga koşullarında hem polimerin ortalama molekül ağırlığının yükseldiği, hem de tepkime süresinin kısaldığı görülüyor. Bu da diş hekimliği uygulamalarında avantaj sağlıyor. Bunun yanı sıra insan vücudundaki fiziksel ve biyolojik işlevleri algılamak, kontrol etmek ve görüntülemek için mikrodalga ışımaya ve görüntüleme teknikleri geliştirildi. Hayli kapsamlı sistemlerden oluşan bu teknikler vücut işlevlerindeki değişiklikleri kontrol etmek ve görüntülemek amacıyla çoğunlukla vücutla temas eden yayıcı bir anten ve belirli bir mesafeye yerleştirilmiş bir algılayıcı ile birlikte kullanılıyor. Beyindeki kan akışının ve atımlı kan akışının tespiti, termal görüntüleme ve beyindeki sinirsel etkinliğin tespiti bu uygulamaların örnekleridir. Son yıllarda bu uygulamalar, mikrodalga tomografi, mikrodalga radyometri ve mikrodalga tanı radarı gibi yeni tanı teknikleri üzerinde yoğunlaşmıştır. Sağlıklı doku ile kanserli tümör dokusunun elektriksel iletkenlik özellikleri arasında mikrodalga frekansında belirgin bir fark olması, mikrodalga ile görüntüleme tekniklerinin geliştirilmesine yardımcı olmuştur.

Bunların yanı sıra kemik yapısında meydana gelen hasarların tedavisinde, kemikteki boşluğu doldurarak boşlukta ödem oluşmasını ve yumuşak dokunun boşluğa girmesini engelleyen, yeni kemik oluşumuna da yardımcı olabilen kemik dolgu malzemelerinin üretiminde de mikrodalgadan yararlanılıyor. Kemikğin doğal yapısındaki çeşitli inorganik bileşenleri içeren biyoseramikler, kemik dolgu malzemesi olarak, toz ya da gözenekli bloklar halinde kullanılıyor. Mikrodalga'nın hızlı hacimsel ısıtma, yüksek tepkime hızı, parçacıklarının küçük olması, büyüklüklerinin birbirine yakın olması ve yüksek safılık sağlama avantajlarından yararlanılarak, kemiğe daha benzer dolgu malzemeleri üretme çalışmaları hâlâ devam ediyor.



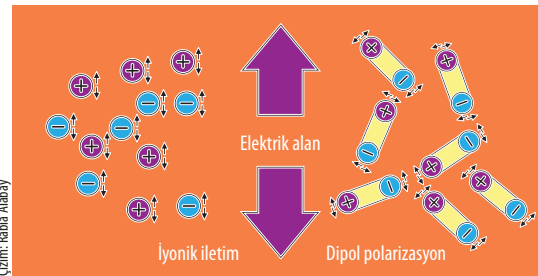
Kimya alanında

Mikrodalga ışınımının kimyasal tepkimelerde kullanılması için 1980'lerde başlayan çalışmalar 2000'li yıllarda hızla arttı. Yapılan ilk çalışmalarda ev tipi mikrodalga fırınlar kullanıldı. 1990'larda mikrodalga reaktörlerinin geliştirilmesi ile daha güvenilir sonuçlar alındı ve yüksek tekrarlanabilirlik sağlandı.

Mikrodalgalar boyaların, seramiklerin, polimerlerin ve selüloz ürünlerin kurutulmasında, kaynatılmasında, buharlaştırılmasında ve sinterlenmesinde de (bir katının küçük parçalarını erime noktasına kadar ısıtıp birbirine kaynatma işlemi) kullanılıyor. Ayrıca tekstilde boyanmış iplik çilelerinin kurutulmasında, selüloz atıkların işlenmesinde, kâğıt ve karton kurutma işlemlerinde, ahşapta oluşan mantarların yok edilmesinde, plastik ve kauçuk vulkanizasyonunda (kauçuğun kükürt köprüleri ile çapraz bağlanarak daha dayanıklı hale getirilmesi işlemi), seramiklerin sentezlenmesinde, kurutulmasında, kalsinasyonunda (bir maddenin nemini ve uçucu bileşenlerini uzaklaştırmak için uygulanan ısıtma işlemi) ve sinterlenmesinde kullanılıyor.

Mikrodalga'nın çeşitli materyallerle etkileşimi:

- a) elektriksel iletken
- b) yalıtkan
- c) mikrodalgayı soğuran malzemeler
- d) mikrodalgayı soğuran malzeme içeren çözeltiler



Mikrodalga ile moleküllerin etkileşim mekanizmaları

Plastiklerin hammaddesi olan polimerlerin mikrodalga ışımaya ile üretimine 20 yıl kadar önce polimerleşme tepkimelerinin hızını artırmak amacıyla başlanmıştı, ancak son yıllarda mikrodalga kullanımını giderek arttı. Mikrodalga ile gerçekleştirilen polimerleşme tepkimelerinde polimer zincirini oluşturan birincil bağlar herhangi bir zarar görmediğinden kimyasal yapı bozulmaz. Mikrodalga, polimerleşme tepkimelerinde kullanılan sıcaklıkta aktifleşen başlatıcıların daha kısa sürede aktif hale gelmesini sağlar,

bu sayede tepkime daha kısa sürede gerçekleşir. Örneğin yaygın olarak kullanılan plastiklerden biri olan polistirenin sentezi geleneksel yöntemlerle (su banyosu veya ısıtma ceketini ile tepkime sıcaklığında ısıtma) 6 saatte gerçekleşirken, mikrodalga ile bu süre 8 dakika civarındadır.

Polimer malzemelerin yapısal özelliklerini mikrodalga ile değiştirmek ve geliştirmek de mümkün. Örneğin tıbbi uygulamalarda sıklıkla kullanılan kitosanın (deniz kabukluları ve böceklerde bulunan kitinden elde edilen doğal bir polimer) yapışkanlık özelliğinin artırılması ve su ile şişme özelliğinin değiştirilmesi amacıyla akrilik asit ile aşılması, mikrodalga koşullarında geleneksel yöntemlerden 8 kat daha hızlı gerçekleşir.

Mikrodalga enerjisi, proteinlerin yapı taşları olan amino asitlerin bir araya gelmesiyle oluşan peptitlerin sentezinde de kullanılıyor. Peptitler hücreler arası haberleşme, metabolizma, bağışıklık cevabı ve üreme gibi pek çok biyokimyasal olayda yer alır. Peptitlerin bu önemli rolü, ilaç adayı olmalarını sağlamıştır. Peptit sentezinde mikrodalga ilk kez 1992 yılında kullanılmıştır. Sentez sırasında mikrodalga enerjisi sürekli verilmez, tepkime sırasında belirlenen sürelerde veya belirlenen sıcaklığa ulaşılan kadar verilir. Mikrodalganın dipol etkileşimlerden kaynaklanan titreştirme özelliği, peptit sentezinde çok etkindir. Bu sayede reçine üzerinde büyüyen peptid zincirinde oluşabilecek ve eksik amino asit eklenmesine neden olabilen zincirlerin girişimi (agregasyon) engellenebilir.

Mikrodalgaların Avantajları

Mikrodalgalar kimyasal maddeleri doğrudan ısıtır ve karışımında seçici ısıtma sağlar. Isıtma doğrudan ve merkezdendir, ısıtılan maddede sıcaklığın malzeme boyunca değişimi minimumdur. Mikrodalga ekipmanları otomatik sistemler ile birleştirilebilir, güç seviyesi kontrol edilebilir.

Mikrodalgalar enerjiyi malzemeye bir araç vasıtasıyla taşımaz, dolayısıyla kullanılan ortamda kirlenme olmaz ve sistem daha sağlıklı ve temiz kullanılabilir. Ayrıca sistemler kesikli ve sürekli olarak uygulanabilir.

Mikrodalga ile ısıtma geleneksel yöntemlerden çok daha hızlıdır. Mikrodalga uygulamasının en önemli özelliği ısı üretiminin moleküler düzeyde başlamasıdır. İçten ısınma sağlandığı için de sıcaklık dağılımı daha homojendir ve yüzeyin aşırı ısınması engellenir. Bu sayede hem zamandan hem de enerjiden çok büyük tasarruf sağlanır. Mikrodalga enerji-

sinin ısıya dönüşme verimi hayli yüksektir. Geleneksel yöntemlerde ısı verimi % 7 ile % 14 arasında değişirken, mikrodalga koşullarında bu değer % 40'a kadar çıkar.

Bunların yanı sıra, mikrodalga kullanılarak geleneksel ısıtma ile elde edilmesi mümkün olmayan özellikte ürünler de elde edilebilir. Ayrıca mikrodalga ışımı ile gerçekleştirilen tepkimelerin verimleri geleneksel yöntemlerinkinden daha yüksektir, bu sayede saflaştırma işlemlerinden de çok büyük tasarruf edilmiş olur. Mikrodalga, daha az yan tepkimeye neden olduğundan ürün kalitesi de artar. Mikrodalga fırınlar geleneksel sistemlerden daha az yer kaplar, maliyetleri daha düşüktür, kullanımları ve bakımları kolaydır. Mikrodalga, istenen sonuca ulaşabilmek için diğer ısı aktarım sistemleriyle birleştirilerek de kullanılabilir.

Mikrodalganın Dezavantajları

Isıtma ya da tepkime amacıyla kullanılacak kabın mikrodalgayı geçiren malzemeden üretilmiş olması gerekir; kabın şeklinin ve büyüklüğünün de tepkime üzerinde önemli etkisi vardır. Bunlar mikrodalga kullanımında karşılaşılan güçlükler olarak değerlendirilebilir.

Ayrıca mikrodalga fırınlarda jeneratör işlevi yapan magnetronlar, geleneksel ısıtma elemanlarından daha pahalıdır. Bu yüzden endüstride kullanımları yavaş gelişmektedir.

Mikrodalga fırınlardan radyasyon sızıntısının önlenmesi insan sağlığı açısından çok önemlidir, çünkü insan vücudunun sürekli olarak ve aşırı miktarda mikrodalgaya maruz kalması sakıncalıdır. Vücuda uygulanacak 100 watt'lık mikrodalga enerjisi vücut sıcaklığını 5 dakikada 5°C artırır ve son derece tehlikelidir. Mikrodalgalara en hassas organlar göz ve beyindir. Her iki organda, özellikle de kan dolaşımının zayıf olduğu gözde, oluşan sıcaklık artışı kanla taşınıp yayılamayacağından, kısa zamanda tehlikeli hale gelir. Gözün dayanabileceği maksimum mikrodalga ışınması 2,4 GHz'de 0,08 watt/cm²'dir. İşte bu yüzden, mikrodalga fırın kullanımı, geleneksel fırınlardan farklı emniyet tedbirleri gerektirir. Mikrodalga üreten ve kullanan cihazların daima sızdırmaz tipte, kapalı bir sistem olması zorunludur.

Kaynaklar

- Kempe, K., Becer, R., Schubert, U. S., "Microwave-Assisted Polymerizations: Recent Status and Future Perspectives", *Macromolecules*, Sayı 44, s. 5825-5842, 2011.
Gümüşderelioğlu, M., Polimer Bilim ve Teknolojisi ders notları, Hacettepe Üniversitesi, 2012.
Bogdal, D., Prociak, A., *Microwave Enhanced Polymer Chemistry and Technology*, Blackwell Publishing, 2007.

