

Metal Parçacıklarından Temiz Enerji

Her yıl yeni bir sıcaklık rekoru kırılıyor ve bu durum sanayi ve teknolojinin gelişmesiyle beraber atmosfere salınan karbondioksit miktarındaki artışla ilişkilendiriliyor. Bir sera gazı olan karbondioksit, yeryüzünden uzaya yayılan ısıyı geri yansıtarak Dünya'nın ortalama sıcaklığının yükselmesine neden oluyor. Dünya'nın günümüzdeki ortalama yüzey sıcaklığı Sanayi Devrimi öncesindeki kadar yaklaşık 1°C daha yüksek. Gelecekte atmosfere salınan karbondioksit miktarının azaltılması gerekiyor.



Günümüzde atmosfere salınan karbondioksitin ana kaynağı, sanayide ve taşıma sistemlerinde enerji elde etmek için kullanılan fosil yakıtlar. Bu yakıtların kullanıldığı süreçlerde karbondioksit oluştuğu için gelecekte fosil yakıtların yerini daha temiz ve çevre dostu yakıtların alması gerekiyor. Ayrıca fosil yakıtlar yenilenebilir bir enerji kaynağı olmadığından uzun vadede kullanılmaları zaten imkânsız. Dolayısıyla gelecekte dünyanın ihtiyacını karşılayabilecek yenilenebilir yakıtların geliştirilmesi zaten bir gereklilik.

Güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, jeotermal enerji, hidrolik enerji ve termonükleer enerji ilke olarak elektrik üretiminde fosil yakıtların yerini alabilir. Ancak fosil yakıtlar sadece elektrik üretmek için kullanılmıyor. Örneğin motorlu taşıtlarda hâlâ yaygın olarak fosil yakıtlar kullanılıyor. Her ne kadar elektrikle çalışan taşıtlar olsa da elektriği depolamak, bir yerden başka bir yere aktarmak ve ticaretini yapmak fosil yakıtlar kadar kolay değil. Dolayısıyla günümüzde kısmen kullanılan rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi ve diğer yenilenebilir temiz enerji kaynakları elektrik üretiminde fosil yakıtların yerini alsın bile hâlâ taşıma sistemlerinde kullanılabilecek, depolanması ve aktarılması kolay, çevre dostu yeni yakıtlara ihtiyacımız var.

Alternatif Enerji Kaynakları

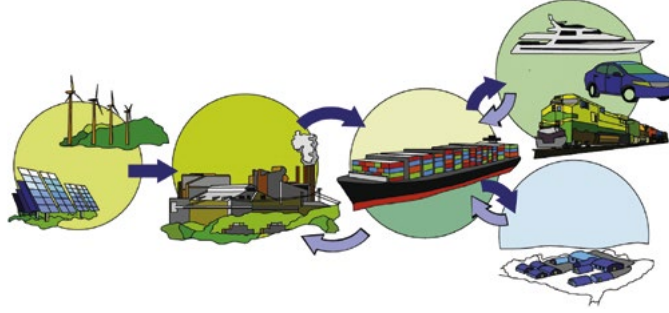
Fosil yakıtlara alternatif olabilecek enerji kaynakları arasında biyoyakıtlar sayılabilir. Ancak fotosentezle güneş enerjisinin kimyasal enerjiye dönüştürülmesiyle üretilen biyoyakıtların, özellikle havacılıkta ve çeşitli ulaşım araçlarında en iyi seçenek olsa da, tek başına fosil yakıtların yerini almasının imkânsız olduğu tahmin ediliyor. Çünkü fotosentezin güç yoğunluğu (birim zamanda ve birim hacimde elde edilen enerji miktarı) düşük.

Günümüzde bataryalar üzerine pek çok araştırma yapılıyor. Ancak bataryaların enerji yoğunluğu, fosil yakıtlarının onda birinden daha az. Bu cihazların sağladığı enerji ancak küçük binek araçların ihtiyacını görece kısa mesafeler için karşılayabilecek düzeyde. Bataryaların enerji yoğunluğu lokomotifleri, gemileri, yük araçlarını, iş makinelerini ve ağır askeri araçları çalıştırmak için yeterli değil. Bu durumun birkaç sebebi var. Öncelikle geleneksel bataryalar hem yakıtı hem de bu yakıttan enerji elde etmek için gerekli oksijeni içeriyor ve bu durum sistemde depolanan enerji yoğunluğunun düşük olmasına neden oluyor. İkincisi, bataryalarda meydana gelen kimyasal tepkimeler oda sıcaklığında (düşük bir sıcaklıkta) gerçekleştiği için enerji yavaş bir hızla elde ediliyor. Diğer taraftan, fosil yakıt kullanılan içten yanmalı motorlar, yüksek sıcaklıklarda çalışıyor ve yakıt yakmak için havadaki oksijeni kullanıyorlar. Oksijenin depolanmasının gerekmemesi sistemdeki enerji yoğunluğunun yüksek olmasını sağlıyor. Ayrıca yanma tepkimesinin yüksek sıcaklıkta ve yakıt-oksijen karışımının yoğunluğunun optimum seviyede olmasını sağlayan yüksek bir basınç altında gerçekleşmesi, güç yoğunluğunun da yüksek olmasını sağlıyor.

Geleneksel bataryalara alternatif olabilecek, havadaki oksijeni kullanan metal-hava bataryaları var. Alüminyum, çinko, demir veya lityum içeren bu bataryalar, hem oksijenin sistemde depolanmasının gerekmemesi hem de metallerin sağladığı

yüksek enerji yoğunluğu sebebiyle, geleneksel bataryalardan daha yüksek enerji ve güç yoğunluğuna sahipler. Fakat bu bataryaların düşük sıcaklıklarda çalışması kimyasal tepkimelerin yavaş ilerlemesine sebep oluyor ve pahalı katalizörlerin (kendisi tepkimede harcanmadan tepkimenin hızını artıran maddelerin) kullanılmasını gerektiriyor.

Bir diğer temiz enerji kaynağı alternatif, hidrojen gazı. Bu gazın pek çok özelliği enerji elde etmek için kullanılmaya çok uygun. Örneğin özgül enerjisi yüksek,



tepkimelere girmeye istekli ve yakıldığında çevreye zararlı gazlar oluşmuyor. Ayrıca hidrojen gazı, içten yanmalı motorlardan gaz türbinli motorlara kadar pek çok teknolojiyle uyumlu. Ancak hidrojen gazının fosil yakıtların yerini almasının önünde iki önemli engel var. Birincisi sıkıştırılmış hidrojen gazının yoğunluğunun çok düşük olması. Daha yüksek yoğunluğa sahip olması için çok düşük sıcaklıklarda depolansa bile hidrojen gazının yoğunluğu hidrokarbon yakıtlarının onda birinden daha az. Ayrıca hidrojen gazının sıkıştırılması ve depolanması enerji gerektiren bir süreç. Uzun zamandır hidrojen gazı depolama üzerine yapılan çalışmalara rağmen, yakın gelecekte depolanmış hidrojenin yoğunluğunun sıvı hidrojeninkinin üzerine çıkarılabileceği düşünülmüyor. Hidrojen gazının fosil yakıtların yerini almasının önündeki diğer önemli engelse hidrojenin yanıcı ve patlayıcı bir gaz olması. Hidrojen gazını güvenli bir biçimde depolamak ve kullanmak fosil yakıtlara göre çok daha zor.

Hidrojen gazını üretmek ve depolamak ile ilgili sorunlar, metal-su tepkimelerinden yararlanılarak aşılabılır. Metaller,

suyla tepkimeye girdikleri zaman yüksek miktarda enerji açığa çıkarken metal oksitler (metal ve oksijen atomlarından oluşan bileşikler), metal hidroksitler ve hidrojen gazı oluşur. Bu durum metal-su tepkimelerinden, gaz türbinli motorlarda ve yakıt gözelerinde enerji elde etmek için kullanılabilir hidrojen gazını üretmede yararlanılabileceği anlamına gelir. Böylece hidrojen gazının depolanması ve düşük enerji yoğunluğundan kaynaklanan sorunlar da aşılmış olur. Ancak metal-su tepkimeleri, sıcaklık ve basıncın düşük ya da orta seviyede olduğu ortamlarda hayli yavaş ilerliyor. Bu yüzden metal-su tepkimelerini kullanarak yüksek güç yoğunluğu elde etmek kolay değil. Bu amaçla kullanılabilir bir motor geliştirmek çok zor.

Araştırmacılar tarafından üzerinde yoğun çalışmalar yapılan alanlardan biri de havadaki karbondioksit ve hidrojeni ham madde olarak kullanarak hidrokarbon yakıtları sentezlemek. Bu yöntemde enerji kaynağı olarak güneş ışığı ya da elektrik kullanılıyor ve elde edilen ürünler genellikle solar yakıt olarak adlandırılıyor. Hidrokarbonların fiziksel ve kimyasal özellikleri zaten içerisinde çeşitli hidrokarbonlar bulunan fosil yakıtlara benzediği için, solar yakıtlar günümüzde kullanılan teknolojilerle ve taşıma sistemleriyle uyumlu. Bu yakıtların elde edilmesiyle ilgili en önemli sorun atmosferdeki karbondioksit derişiminin düşük olması. Atmosferin hem ham madde kaynağı hem de atıkların içine bırakıldığı bir havuz görevi gördüğü bu yöntemin verimli bir biçimde enerji elde etmede kullanılabilmesi için pahalı altyapı yatırımlarının yapılması gerekiyor. Esasen atmosferdeki karbondioksit yerine sanayi kuruluşlarında üretilen karbondioksitin kullanılması durumunda, solar yakıtları daha ekonomik bir biçimde elde etmek mümkün olabilir. Ancak solar yakıtların motorlu araçlarda kullanılması atmosfere karbondioksit salımıyla sonuçlanacağı için, üretimleri sırasında temiz enerji kullanılsa bile, çevre dostu oldukları söylenemez.

Metal Tozları

Metallerin açık havada ve yanma ürünleri içinde yanabildiği yüzyıllardır biliniliyor. Örneğin roket yakıtlarında ve havai fişeklerde metal tozları kullanılıyor. Ayrıca demir ve çeliği kesmek için de yaygın olarak metallerin yanmasından yararlanılıyor. Kesici aletleri bilerken ortaya çıkan kıvılcımlar da etrafa saçılan metal parçalarının havada yanmasıyla oluşur. Ancak metallerin yanmasıyla ilgili bilimsel araştırmaların gerçek anlamda 20. yüzyılın ortalarından sonra başladığı söylenebilir.

Metaller oksijenle tepkimeye girdiğinde metal oksit bileşikleri oluşur ve yüksek miktarda enerji açığa çıkar. Metal oksit bileşikleri -örneğin Fe_2O_3 , Al_2O_3 - kararlı bileşiklerdir. Büyük çoğunluğu insan sağlığı için zararsız olan bu maddeler, normal koşullar altında katı halde bulunduğu için toplanmaları ve geri dönüştürülmeleri kolaydır. Günümüzde bor, yüksek enerji yoğunluğu sebebiyle patlayıcılarda ve iticilerde katkı maddesi olarak zaten kullanılıyor. Berilyum da enerji yoğunluğu yüksek olan metallere, ancak berilyum oksit insan sağlığına zararlı olduğu için yakıt olarak kullanılabileceği düşünülüyor. Doğada çok bol miktarda bulunan alüminyum, magnezyum, silisyum ve demir metallerinin enerji yoğunluğu da hayli yüksek. Bu metallerin gelecekte yakıt olarak kullanılması mümkün olabilir.

Metallerin yakıt olarak kullanıldığı bir dünyada enerji trafiği özetle şu şekilde işleyebilir: Metal tozları, temiz enerjinin bol olduğu bölgelerde üretilebilir ve daha sonra diğer bölgelere taşınabilir. Metal tozları özel olarak tasarlanan cihazların içinde yakılarak enerji elde edilebilir. Yanma sonucunda oluşan katı metal oksit bileşik-

leri toplanabilir ve daha sonra çevre dostu enerji kaynakları kullanılarak geri dönüştürülebilir. Tüm bu süreçler sırasında sera gazları ya da çevreye zararlı herhangi bir ürün oluşmaz. Üstelik metal oksit bileşikleri, hidrokarbonlar kadar güvenli bir biçimde depolanabilir ve taşınabilir. Ayrıca nemden ve havadan korunacak biçimde depolandıklarında, metal tozlarının raf ömrü sınırsızdır. Bu senaryonun gerçeğe dönüşmesinin önündeki en önemli engel şu an metal tozlarındaki kimyasal enerjiyi yüksek hızlarla açığa çıkaracak bir motorun olmaması.

Esasen metal-hava yanmalı motorları tasarlamak, düşük sıcaklıklarda çalışan bir metal-su yanmalı motoru tasarlamaktan daha zor. Ancak eğer geliştirilebilirlerse, yüksek güç yoğunluğuna ihtiyaç duyulan işlerde üstün performans gösterebilirler. Üstelik söz konusu olan motorlu araçlar olduğu zaman, metal-su motorlarında hem metal hem de su, sistemin ağırlığını artırarak performansının düşmesine sebep olacaktır. Metal-hava motorlarında ise metal dışında bir ağırlık yok. Yanma için gerekli olan hava atmosferden doğrudan sağlanacağı için güç yoğunluğu hidrokarbon yakıtların kullanıldığı motorlarınkine yakın metal-hava motorları geliştirmek mümkün olabilir. Ayrıca bu motorlarda metal-su motorlarında kullanılmaya uygun olmayan metaller de -örneğin demir- kullanılabilir.

Geçmişte metal yakıtların içten yanmalı motorlarda enerji elde etmek için kullanılabileceği öne sürülmüştü. Ancak, metal tozlarının özellikleri içten yanmalı motorlarla uyumlu değil. Yanma sonucunda ortaya çıkan metal oksit bileşikleri hem içten yanmalı motorların tasarımına uygun değil hem de motorla-

rı aşındırabilir. Dolayısıyla metal yakıtlardan enerji elde edebilmek için dıştan yanmalı motorlara odaklanılması gerekiyor.

Dıştan yanmalı motorlar günümüzde pek çok alanda enerji elde etmek için kullanılıyor. Fosil yakıtlar, jeotermal enerji, nükleer enerji ya da güneş enerjisiyle çalışan bu motorların metal yakıtlarla çalışabilecek hale getirilmesi mümkün olabilir.

Taşıma sistemleri göz önüne alındığında, modern dıştan yanmalı motorların verimliliği, Sanayi Devrimi döneminde kullanılan ilkel, kömürle çalışan dıştan yanmalı motorlarınkinden çok daha yüksek. Hatta günümüzde dıştan yanmalı motorların verimliliği ve güç yoğunluğu içten yanmalı motorlarınkini geçmeye başladı. Ayrıca dıştan yanmalı motorlar, hibrit-elektrik güç aktarma aksamalarının parçaları olarak da iyi performans göstermeye aday.

Dr. J. M. Bergthorson ve arkadaşları, *Applied Energy*'de yayımladıkları bir makalede metallerin yakılmasıyla yenilenebilir enerji elde edilmesi konusunu ele alıyor. Sonuçlar, metal tozlarının hidrokarbon yakıtlara yakın hızlarla yakılabileceğini gösteriyor. Yakıcı gazın bileşimi ve sıcaklığı değiştirilerek arzu edilen yanma hızları ve metal oksit parçacıklarının büyüklükleri kontrol edilebiliyor. Elde edilen yüksek ısı, sanayide ve konutlarda ısı gerektiren işlerde kullanılabileceği gibi mekanik ve elektriksel güç elde etmek için de kullanılabilir.

Yandaki sayfada Dr. J. M. Bergthorson ve arkadaşlarının öne sürdüğü, metal yakıt kullanılan dıştan yanmalı motorla ilgili bir çizim görüyorsunuz. Sistem bir metal yakıt tankı, bir toz dağıtma sistemi ve katı metal oksitlerin toplandığı bir tankla bağlantılı bir yanma gözesinden oluşuyor. Böyle bir motorla metal yakıtlardaki kimyasal enerji, yüksek hızlarla ısı enerjisine dönüştürülebilir ve çeşitli amaçlarla (bkz. yan sayfadaki çizim) kullanılabilir. Örneğin bu ısı enerjisi doğrudan sanayide ya da konutlarda ısıtma amacıyla veya mekanik enerjiye dönüştürülerek lokomotifleri, otomobilleri ve gemileri hareket ettirmek için kullanılabilir. Üstelik, içten yanmalı motorların aksine, dıştan yanmalı motorları daha büyük boyutlarda imal ederek kapasitelerini artırmak çok kolay.



Metal tozlarının fiziksel özellikleriyle kömür tozlarınınkilerin birbirine benzemesi, günümüzdeki kömür termik santrallerinin kolaylıkla metal tozlarından enerji elde etmek için kullanılabilir hale dönüştürülebileceğini gösteriyor. Bu durum metal yakıtların kullanılmaya başlaması için gerekli yatırımların maliyetini düşürecek. Ayrıca güneş enerjisi ve rüzgâr enerjisi gibi temiz enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin depolanması ve ticareti bakımından da metal yakıtlar, hidrojen gazı ve geleneksel bataryalara göre çok daha avantajlı.

Araştırmacılar tarafından önerilen metal yakıtlı enerji sistemlerinin; metallerin yüksek enerji yoğunluğu, ölü ağırlığın (enerji elde etmede kullanılmayan ağırlığın) düşük olması ve yakmanın yüksek sıcaklıklarda gerçekleştiği için tepkime hızlarının yüksek olması sebebiyle yüksek performansa sahip olacağı söylenebilir. Enerji elde edilirken atmosfere hiçbir şey salınmaması ve yanma ürünlerinin etkin bir biçimde geri dönüştürülebilmesi, oluşan katı metal oksitlerin tamamının toplanmasıyla mümkün oluyor. Ancak yanma tepkimesi sonucunda oluşan metal oksitler ham madde olarak kullanılan metalden daha ağır olduğu için metal oksit tankları aynı zamanda sistemin ağırlığının işletim sırasında giderek artmasına da neden olacaktır. Bu durum durağan sistemlerde sorun olmasa da ulaşım sistemlerinin performansını azaltacaktır.

Gelecekte geliştirilmesi muhtemel metal-hava motorlarında kullanılacak yakıtlar arasında demir öne çıkıyor. Günümüzde metalürji ve kimyasal elektronik endüstrilerinde her yıl milyonlarca ton demir tozu zaten üretiliyor. Bu metali yaklaşık 2200 Kelvin sıcaklıkta dıştan yanmalı motorlarda yüksek verimle yakmak mümkün. Üstelik bu sıcaklık hem demirin kaynama sıcaklığından daha düşük (dolayısıyla demir tozları bu sıcaklıklarda depolanabilir) hem de demir oksitlerin ayrışma sıcaklığından daha yük-

sek (dolayısıyla demir oksit kolayca toplanabilir). Demirin önemli bir özelliği, geri dönüşümü ile ilgili zaten bilinen verimli yöntemler olması. Demir oksitleri 1000°C'nin altındaki sıcaklıklarda hidrojen ile tepkimeye sokarak demir elde etmek mümkün. Dolayısıyla temiz kaynaklardan elde edilen hidrojen kullanılarak yanma sonucunda oluşan demir oksitler geri dönüştürülebilir. Ayrıca hidrokarbon yakıt kullanılan enerji santrallerinde ortaya çıkan karbondioksitin atmosfere salınmasını engellemek için kurulmuş reaktörlerde de demir oksitler kullanılıyor. Dolayısıyla yakıt olarak demir kullanılan dıştan yanmalı motorlar, çeşitli süreçler sonucunda oluşan karbondioksitin atmosfere salımını engellemek için de kullanılabilir.

Dıştan yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılacak bir diğer element silisyum. Silisyumun yanmasıyla oluşan ve camın da ana maddesi olan silisyumdioksit hem çevre dostu hem de ev atıkları için kurulmuş tesislerde kolaylıkla geri dönüştürülebilir. Ancak şu ana kadar silisyumun yakılmasıyla ilgili yapılmış yeterli çalışma yok.

Özet olarak, Dr. J. M. Bergthorson ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalar, metal yakıtların enerji elde etmek için kullanılabilirliğini gösteriyor. Metallerin yakılmasıyla elde edilen enerji hem doğrudan ısınma amacıyla kullanılabilir hem de dıştan yanmalı motorlar yardımıyla hareket enerjisine dönüştürülebilir. Metallerin yanma süreci henüz hidrokarbon yakıtlarınki kadar iyi anlaşılmış değil. Ancak şu anki bilgilerimiz gelecekte dünya genelinde metal yakıtların kullanılmasının mümkün olabileceğini gösteriyor. Bunun gerçekleşmesinin önündeki en önemli engel metal yakıtların kullanıldığı motorların henüz geliştirilmemiş olması. Eğer metal yakıtlar, fosil yakıtların yerini alabilirse bunun çevre açısından da çok yararlı sonuçları olacaktır. Çünkü hidrokarbon yakıtların aksine metal yakıtların kullanıldığı süreçler atmosfere sera gazı salımıyla sonuçlanmıyor.

Kaynak

- Bergthorson, J. M. ve ark., "Direct combustion of recyclable metal fuels for zero-carbon heat and power", *Applied Energy*, Cilt 160, s. 368-382, 2015.

