

# HİDROJEN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Beyza Yıldırım<sup>1</sup>, Aysel Kantürk Figen<sup>2</sup>,  
Mehmet Karakılıç<sup>3</sup>

## 1. GİRİŞ

Nüfusun artmasıyla birlikte, ısı ve elektrik üretimi, ulaşım ve endüstriyel tesislerin enerji gereksinimini büyük ölçüde fosil kaynaklar ile karşılanmaya çalışılmıştır. Fosil kaynakların yanması sonucu oluşan karbondioksit (CO<sub>2</sub>) salımlarının küresel iklim değişikliğine etkisi büyük bir endişe kaynağı olarak görüldüğünden, uluslararası alanda, çevre koruma ve iklim değişikliğini önleme konusunda üç ana hedef belirlenmiştir.

Net Sıfır (karbon salımlarının azaltılması), Hızlandırma (hedeflere ulaşmak için gerekli olan eylemlerin hızlandırılması) ve Yeni Momentum (hedeflere ulaşmak için yapılacak uygulamaların daha geniş kitlelere benimsetilmesi ve ivmelendirilmesi) hedeflerinin gerçekleştirilmesi için geleneksel fosil kaynakların kullanımının azaltılarak zarsız enerji kaynaklarına geçilmesi gerekmektedir. Bu nedenle karbon yakalama, kullanma ve depolama tek-

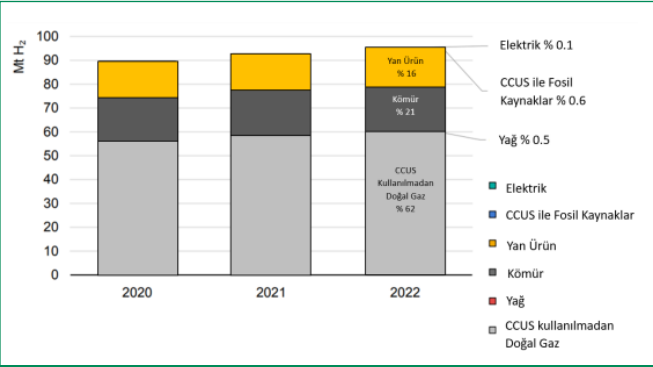
nolojilerinin uygulanması (CCUS - Carbon Capture, Utilization, and Storage); yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelme, yüksek verimli temiz teknolojilerin kullanımı ve gaz salım değerlerini azaltma konusunda önemli bir geçiş süreci olarak karşımıza çıkmaktadır [1]. 2020-2022 yılları arasında hidrojen üretim yöntemlerine bakıldığında; 2021 yılına kıyasla %3'lük bir artış ile 2022 yılında 95 Mt hidrojenin %62'lik pay ile CCUS teknolojisinin bulunmadığı doğal gazdan elde edildiği görülmektedir (Şekil 1).

Düşük salımlı hidrojen üretimi, tüm üretimin %1'inden azını oluşturmakta olup açıklanan projelere bakıldığında çok fazla sayıda düşük salımlı hidrojen üretim projesinin geliştirilme aşamasında olduğu görülmüştür [2]. CCUS teknolojileri kullanılarak fosil yakıtlardan hidrojen eldesi ve elektrolizör kullanımının geliştirilmesi ile 2030 yılında 20 Mt düşük salımlı hidrojen üretimi gerçekleştirilebileceği öngörülmektedir (Şekil 2) [1].

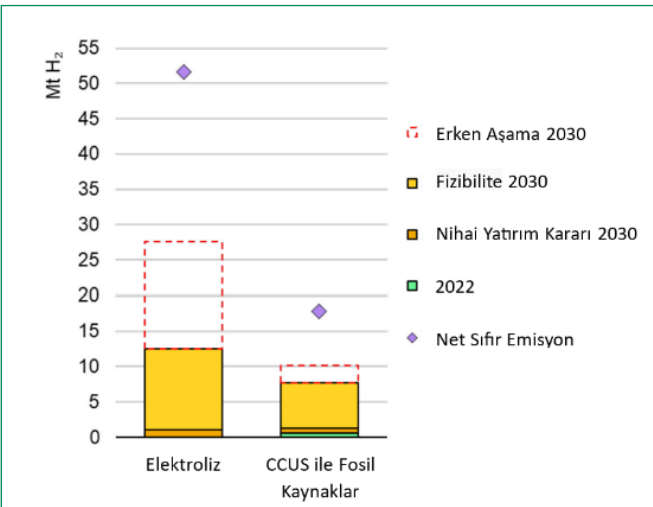
<sup>1</sup> Kimya Müh., Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya Müh. Bölümü - beyza.yildirim2@std.yildiz.edu.tr

<sup>2</sup> Prof. Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, Temiz Enerji Teknolojileri Enstitüsü - akanturk@yildiz.edu.tr

<sup>3</sup> Prof. Dr., Çukurova Üniversitesi, Fizik Bölümü - kkilcik@cu.edu.tr



Şekil 1. Hidrojen Üretim Teknolojileri 2020-2022 [1]



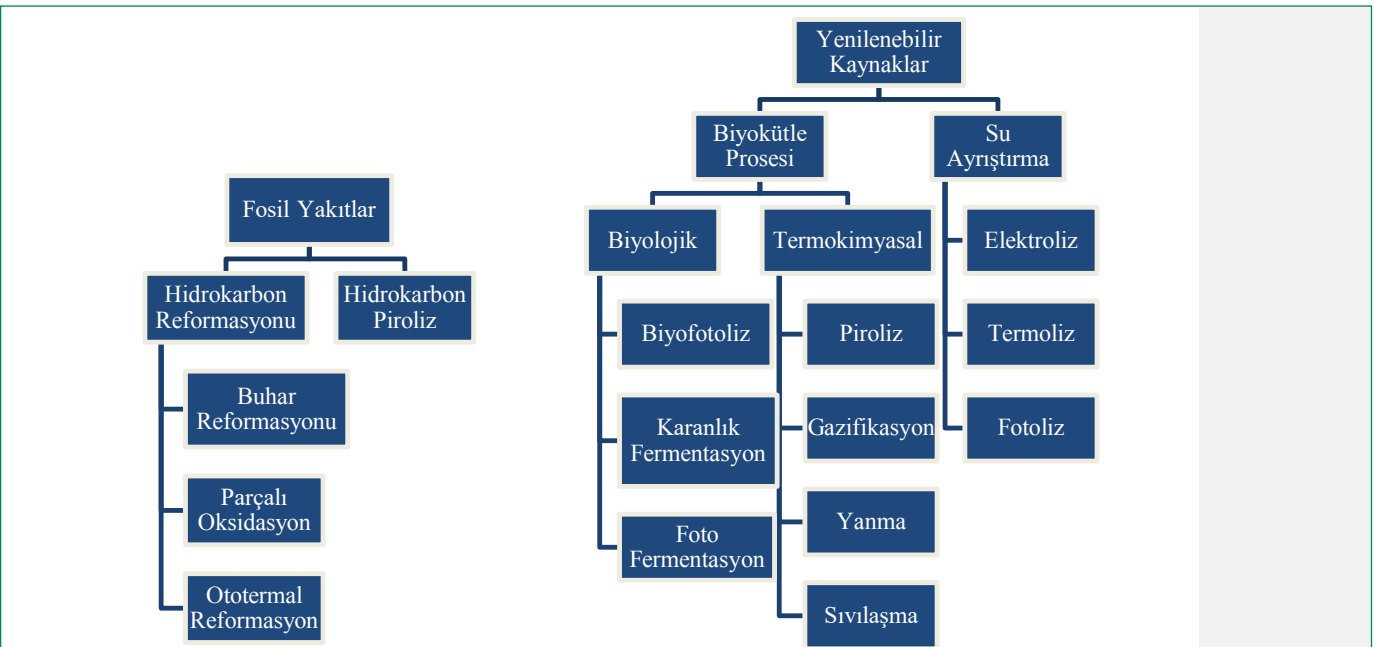
Şekil 2. Düşük Salımlı Hidrojen Üretimi Hedefleri [1]

Sürece ve enerji kaynağına bağlı olarak sınıflandırılan birçok hidrojen üretim yöntemi bulunmaktadır. Hidrojen üretimi için kullanılan hammaddelere göre geleneksel ve yenilenebilir teknolojiler olmak üzere iki ana gruba ayrılacak çeşitli işlemler vardır. Birinci grupta fosil yakıtlar ve hidrokarbon kullanılarak piroliz (organik malzemelerin yüksek sıcaklık ve düşük oksijen ortamında parçalanması) ve reformasyon (hidrokarbon yakıtların, yüksek sıcaklık ve basınç altında su buharı veya oksijenle tepkimeye girmesi) yöntemleriyle hidrojen üretilmektedir.

İkinci grupta, biyokütle veya su gibi yenilenebilir kaynaklardan hidrojen üreten yöntemler yer almaktadır. Termokimyasal ve biyolojik yöntemler olmak üzere iki genel alt grupta incelenir. Piroliz, gazlaştırma, yanma, sıvılaştırma, biyofotoliz, fermentasyon yöntemleri ise yenilenebilir teknolojiler olarak dikkat çekmektedir (Şekil 3). Bu yöntemler ile elde edilen hidrojenin karbon sıfır ile mücadelede karbon yakalama, kullanma ve depolama teknolojileri ile bütünleşmesi zorunludur.

## 2. FOSİL YAKITLARDAN HİDROJEN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Yeryüzündeki organik malzemelerin, biyolojik canlıların kalıntılarının, geçirdiği milyonlarca yıl boyunca biyolojik, kimyasal, fiziksel ve jeolojik doğal süreçler sonucunda sıcaklık, derinlik ve zamana bağlı olarak oluşturduğu, kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtlar, enerji kay-



Şekil 3. Hidrojen Üretim Yöntemleri

naklarıdır. Bu yakıtlar dünya enerji tüketiminin büyük bir kısmını karşılamak için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

- **Kömür:** Bitki kalıntılarında oluşan kömür, yıllar içinde yer altında biriken organik malzemenin ısı ve basınç koşulları altında dönüşmesi sonucu oluşur. Kömür, dünya enerji üretiminde özellikle elektrik üretiminde önemli bir rol oynamaktadır.
- **Petrol:** Deniz canlıları ve planktonlar gibi organik maddelerin çökmesi ile oluşan organik içerik bakımından zengin sedimanter kayaların jeolojik zaman içerisinde gömülmesiyle ısı ve basınç etkisi altında bir dizi kimyasal süreç sonunda oluşan endüstriyel bir üründür. Petrol, yakıt olarak kullanılmasının yanı sıra petrokimya endüstrisinde çeşitli ürünlerin üretiminde de kullanılmaktadır.
- **Doğal Gaz:** Doğal gaz, organik maddelerin çürümesi sonucu oluşan metan (CH<sub>4</sub>) ve diğer hidrokarbon gazlarını içerir. Genellikle petrol rezervlerinin yanında bulunur veya ayrı doğal gaz rezervleri olarak varlığını sürdürür. Doğal gaz, ısıtma, enerji üretimi ve endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır.

Şekil 3'te görüldüğü gibi fosil yakıtlardan, hidrokarbon reformasyonu ve piroliz yöntemi ile hidrojen üretilebilmektedir. Reformasyon, endüstriyel ölçekte hidrojen üretiminde en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Hidrojen, rafinerilerde, amonyak üretiminde, petrokimya tesislerinde ve diğer çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Özellikle doğal gaz, hidrojen üretimi bakımından oldukça verimli bir kaynaktır. Ancak, atmosfere karbondioksit (CO<sub>2</sub>) ve diğer sera gazlarının salımına neden olmaktadır ve küresel iklim değişikliğine neden olmaktadır.

Yapılan çalışmalar hidrojen üretim işlemiyle biyokütle gazlaştırma ve buhar dönüştürme yöntemlerinin dengeli bir yapıda olduğunu göstermektedir. Biyokütle gazlaştırma yöntemi daha yüksek miktarda hidrojen üretimine izin verirken buhar dönüştürme yöntemi ise daha yüksek enerji verimiyle öne çıkmaktadır [3].

**Hidrokarbon Reformasyonu:** Doğal gazdan veya diğer hidrokarbonlardan hidrojen üretmek için kullanılan bir kimyasal süreçtir. Bu süreç, metanın (CH<sub>4</sub>) veya diğer hidrokarbonların su buharıyla (H<sub>2</sub>O) tepkimeye girmesiyle gerçekleşir. Reformasyon süreci genellikle endotermiktir, yani ısı emer. Bu sürecin temel amacı, hidrojen üretmek

iken bunun yanında istenmeyen karbon monoksit (CO) ve karbon dioksit (CO<sub>2</sub>) gibi yan ürünler de üretilmektedir. Saf hidrojen elde etmek için yan ürünler genellikle arıtma adı verilen ek bir işlemle uzaklaştırılır. Hidrojen, bir dizi endüstriyel uygulama için önemli bir malzeme ve enerji taşıyıcısıdır.

Hidrojen, genellikle doğal gaz (metan) veya diğer hidrokarbon kaynaklarından hidrojen gazının elde edilmesi amacıyla kullanılan bir yöntem olan hidrokarbon reformasyonu (reforming) yöntemi ile üretilebilir. Bu süreç genellikle metan reformasyonu (CH<sub>4</sub> reforming) olarak adlandırılır. Metanın su buharı ile tepkimesi sonucu hidrojen ve karbon dioksit oluşur. Metan reformasyonu süreci genellikle üç ana aşamadan oluşur:

- **Sabit Sıcaklıkta Adyabatik Reformasyon (Adyabatik Reforming (İzotermal Reforming)):** Metanın yüksek sıcaklıklarda (~700°C ila 1.000 °C) ve basınç altında su buharı ile tepkimeye sokulmasıdır. Metan, hidrojen, karbon monoksit ve az miktarda karbon dioksit üretilir.



- **Konvektif Reformasyon (Isı Değişimi):** Adyabatik reformasyon aşamasında oluşan sıcak gaz, bir ısı değiştirici aracılığıyla soğutulur ve daha düşük sıcaklıklara indirilir. Bu aşamada su buharı, daha fazla hidrojen üretimi için metan ile tepkimeye girer.



- **Kaydırma Tepkimesi (Shift Reaction) (İlektrojenleşme denir):** Bu aşama, adyabatik ve konvektif reformasyon süreçlerinden elde edilen gazın karbon monoksit içeriğini azaltmak için kullanılır. Bu yöntem, su buharının karbon monoksit ile tepkimeye girerek karbon dioksit ve hidrojen üretmesini içerir.



Bu süreç sonucunda elde edilen gaz genellikle yüksek oranda hidrojen içerir, ancak az oranda karbondioksit, karbon monoksit ve diğer yan ürünler de içerebilir. Bazı uygulamalarda yüksek saflıkta hidrojen gerektiğinden genellikle elde edilen hidrojen gazının artırılması gerekir.

Hidrokarbon reformasyonu, hidrojen üretimi için en gelişmiş tekniktir. Yapılan çalışmalar, bu yöntemde kimyasal reaksiyonları hızlandırmak ve kontrol etmek için katalizörlerin bir plazma ortamında kullanıldığı plazma kataliz

(plazma ve ısıl kataliz birleşimi) uygulanmasının H<sub>2</sub> üretimi üzerinde tek başına plazma ve tek başına ısıl katalizör uygulamasından daha umut verici olduğunu göstermektedir [4].

Buhar veya Metan Reformasyonu (BMR): Buhar reformasyonu veya buhar metan reformasyonu (BMR), genellikle doğal gazdan hidrojen üretimi için kullanılan bir kimyasal süreçtir. Bu süreç, endotermik (ısı emen) bir tepkimedir ve genellikle endüstriyel ölçekte uygulanır. Buhar reformasyonunun temel ilkeleri ve aşamaları:

- *Isıtma (Heating):* Doğal gazın en önemli bileşeni olan metan (CH<sub>4</sub>) ve su buharı (H<sub>2</sub>O), genellikle bir nikel katalizörü ile birleştirilerek bir reaktöre gönderilir. Bu reaktörde, doğal gazdaki karbon ve hidrojen ile su buharının oksijenleri arasında kimyasal tepkime gerçekleşir.
- Kimyasal Tepkime : İlk aşamada gerçekleşen kimyasal tepkime şöyledir:



Metan, su buharındaki H<sub>2</sub> ve O ile tepkimeye girerek karbon monoksit (CO) ve hidrojen (H<sub>2</sub>) üretir.

- *Dengeleme (Shift Reaction- Kaydırma Reaksiyonu):* Elde edilen karbon monoksit gazı, su buharı ile bir su gazı kaydırma reaksiyonu uygulanarak temizlenir:



Bu adım, karbon monoksitin karbon dioksit ve hidrojene dönüştürülmesini sağlar.

- *Soğutma ve Ayırma (Cooling and Separation):* Reaksiyon sonucunda elde edilen gaz karışımı, soğutulur ve ardından çeşitli aşamalardan geçirilerek temizlenmiş hidrojen gazı ve diğer yan ürünler ayrıştırılır.

Bu süreç, endüstriyel ölçekte hidrojen üretimi için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Üretilen hidrojen, petrokimya, rafineri işlemleri, metalurji ve diğer endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Buhar reformasyonu, hidrojenin büyük ölçekte üretimini sağlayan ve enerji yoğun olan bir teknolojidir.

Başlıca hidrojen üretim yöntemlerinden biri olan buhar reformasyon işleminde hidrojen üretim verimini yükseltmek için reaksiyon sıcaklığı, basınç, besleme bileşimi, reaktörün yaplanması, besleme ve süpürme gazı akış

hızları gibi farklı değişkenlerin en uygun şekilde ayarlanması gerekmektedir [5].

**Parçalı Oksidasyon:** Genellikle bir yakıtın oksijenle kısmi olarak yanmasını tanımlayan bir kimyasal süreçtir. Bu süreçte yakıt, yeterli oksijenle reaksiyona girmediği için tam yanma gerçekleşmez. Bu durum, genellikle bir içten yanmalı motorda, gaz türbininde veya endüstriyel bir süreç içinde kontrol edilen koşullarda gerçekleşir. Parçalı oksidasyonun temel özellikleri şunlardır:

- *Kısmi Yanma:* Yakıt, sınırlı miktarda oksijenle tepkimeye girer. Bu, tam yanma olmadan bir dizi yan ürünün oluşmasına neden olur.
- *Yan Ürünler:* Parçalı oksidasyonun bir sonucu olarak, karbon monoksit (CO) gibi yan ürünler ortaya çıkabilir. Bu yan ürünler, tam yanma durumunda karbon dioksit (CO<sub>2</sub>) olarak yanacaktan farklıdır.
- *Sıcaklık Kontrolü:* Parçalı oksidasyon genellikle sıcaklık kontrolü gerektiren bir süreçtir. Sıcaklık, istenmeyen reaksiyonları ve yan ürün oluşumunu denetlemek için dikkatlice ayarlanmalıdır.
- *Kullanım Alanları:* Parçalı oksidasyon, enerji üretimi, sentez gaz üretimi, kimyasal üretim ve endüstriyel süreçler gibi çeşitli uygulamalarda kullanılabilir.
- *Enerji Üretimi:* Parçalı oksidasyon, gaz türbinlerinde veya içten yanmalı motorlarda yakıtın kısmi olarak yanmasını içeren bir enerji üretimi yöntemi olarak kullanılabilir. Bu, özellikle yakıt hücreleri veya güç santrallerinde hidrojen üretimi gibi uygulamalarda önemli olabilir.

Özellikle hidrojen üretimi için parçalı oksidasyon, gaz türbinlerinde ve yakıt hücrelerinde kullanılan bir yöntemdir. Bu süreç, yakıtın kontrol edilen bir ortamda kısmi olarak yanmasını sağlar ancak hidrojenin yanı sıra istenmeyen karbon monoksit gibi yan ürünlerin oluşmasına neden olur. Buharla reformasyona bir seçenek olan kısmi oksidasyon işlemi, metandan kömüre kadar ağır yakıtlarla çalışabilen ve hidrojen üretilen bir yöntemdir [6].

**Ototermal Reformasyon:** Hidrojen üretim süreçlerinden biridir ve genellikle metan (CH<sub>4</sub>) gibi hidrokarbonları kullanarak gerçekleştirilir. Bu süreçte, tepkimeler sırasında ortaya çıkan ısı, tepkimeleri sürdürmek için yeterli olacak kadar enerji sağlar. Bu nedenle, ototermal reformasyon, dış bir ısı kaynağına gereksinim duyulmadan gerçekleşen

bir tür kendiliğinden ısıtma sürecidir. Ototermlal reformasyon süreci genellikle şu aşamalardan oluşur.

- *İlk Isıtma (Initial Heating)*: Metan (CH<sub>4</sub>) ve su buharı (H<sub>2</sub>O) karışımı bir reaktöre gönderilir ve ısıtılır.
- *Tepkimeler (Reactions)*: Yüksek sıcaklıkta gerçekleşen tepkimelerde metan, su buharı ile tepkimeye girer ve hidrojen (H<sub>2</sub>) ile karbon monoksit (CO) gibi ürünleri oluşturur. Bu reaksiyonlar şu şekildedir:



Ototermlal reformasyon süreci, başlangıçta sağlanan ısı ile kendisini sürdürebilen bir ısı dengeye ulaşır.

- *Ürün Ayırma (Product Separation)*: Oluşan gaz karışımı genellikle soğutularak ve çeşitli ayırıştırma yöntemleri kullanılarak hidrojen ve diğer yan ürünlerden temizlenir.

Ototermlal reformasyon, hidrojenin endüstriyel ölçekte üretimi için kullanılan bir yöntemdir. Bu süreç, hidrojenin yanı sıra çeşitli yan ürünlerin oluşmasına neden olabilir. Dış bir ısı kaynağı kullanılmadan, kimyasal tepkimenin yarattığı ısıyı kullandığından, enerji verimliliği açısından önemli bir üstünlüğü vardır.

Ototermlal reformasyon işleminin iyileştirilmesine yönelik geliştirilen bir reaktör modelinin çıktılarını değerlendirebilmek için kimyasal denge uygulamaları yazılımı ile elde edilen termodinamik sonuçlar ile modelin sonuç beklentileri karşılaştırıldığında, uyumlu oldukları görülmüştür. En uygun çalışma koşullarını bulmak için de parametrik optimizasyon çalışması yapılmıştır. Buna göre, 973 K çalışma sıcaklığı ve 1,5 bar basınç altında, %97,6 saflıkta hidrojen üretimi yapılabilmektedir [7].

**Hidrokarbon Piroliz:** Hidrokarbon içeren malzemelerin yüksek sıcaklıkta ve oksijensiz ortamda ısı ayrışımını tanımlar. Bu süreç, genellikle endüstriyel çevrelerde yağ rafinerileri, kimyasal tesisler ve atık yönetimi gibi uygulamalarda kullanılır. Hidrokarbon pirolizi genellikle şu adımlardan oluşur:

- *Isıtma (Heating)*: Hidrokarbon içeren malzeme, yüksek sıcaklıklara ısıtılır. Bu ısıtma işlemi genellikle 500 ila 900 °C arasında gerçekleşir. Isıtma, malzemenin termlal ayrışımına ve hidrojen, metan ve diğer hafif hidrokarbonların oluşumuna neden olur.

- *Ayrıştırma (Pyrolysis)*: Yüksek sıcaklık ve oksijensiz ortamda malzeme parçalanır. Bu ayrıştırma sonucunda, gaz, katı ve sıvı fazda, ve genellikle hidrojen, metan, etilen, benzen gibi hidrokarbonlar oluşur.
- *Ürün Toplama (Product Collection)*: Elde edilen gazlar ve sıvılar, soğutma ve yoğuşma işlemleriyle ayrılır ve toplanır. Bu ürünler daha sonra çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılabilir.

Hidrokarbon pirolizi, atık yönetimi açısından özellikle önemlidir. Çünkü bu yöntem organik atıkların enerji ve değerli kimyasallara dönüştürülmesine olanak tanır. Ayrıca, bu süreç, petrol rafinerilerinde ham petrolün işlenmesi ve çeşitli kimyasalların üretimi için önemli bir adım olarak da kullanılır. Ancak, bu süreçlerin enerji yoğun olduğu ve karbon ayak izi oluşturabileceği unutulmamalıdır. Bu nedenle, enerji verimliliği ve çevresel etkiler dikkate alınmalıdır. Bu işlemin karbon yan ürünü, biçimsel üretimde kullanılabilirse veya ayrıştırılabilirse, üretilen hidrojenin karbon ayak izi düşük olacaktır [8].

### 3. YENİLENEBİLİR ENERJİ TEMELLİ HİDROJEN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Yenilenebilir enerji kaynakları, sınırsız veya yenilenebilir doğal süreçlerden elde edilir. Bu kaynaklar, çevre dostu olmaları ve sürdürülebilir enerji üretimi sağlamaları nedeniyle giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Önemli yenilenebilir enerji kaynakları aşağıda verilmiştir.

- *Güneş Enerjisi*: Güneş enerjisi, güneşten gelen ışık ve ısı enerjisinin kullanılmasıyla elde edilir. Fotovoltaik (PV) hücreler aracılığıyla elektrik enerjisi üretimi ve güneş kolektörleriyle ısı üretimi gibi çeşitli uygulamalarda kullanılır.
- *Rüzgâr Enerjisi*: Rüzgâr enerjisi, rüzgâr türbinleri aracılığıyla rüzgârın kinetik enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesiyle elde edilir. Bu yöntem, genellikle rüzgâr çiftlikleri veya rüzgâr enerjisi santrallerinde uygulanır.
- *Hidroelektrik Enerji*: Hidroelektrik enerji, suyun potansiyel enerjisinin kullanılmasıyla elde edilir. Hidroelektrik santraller, suyun kontrollü bir şekilde salınması ve türbinler aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülmesi biçiminde enerji üretiminde kullanılır.
- *Dalga ve Gelgit Enerjisi*: Deniz dalga hareketleri ve gelgitler, elektrik enerjisi üretimi için potansiyel sağlar. Bu

teknolojiler henüz gelişme aşamasındadır, ancak gelecekte önemli bir rol oynayabilir.

- **Jeotermal Enerji:** Jeotermal enerji, yer altındaki ısı enerjisinin kullanılmasıyla elde edilir. Sıcak su ve buhar, jeotermal enerji santrallerinde türbinleri döndürerek elektrik üretimi için kullanılır.
- **Biyokütle Enerjisi:** Biyokütle, organik malzemelerden elde edilen enerjidir. Bu malzemeler arasında ahşap, evsel atıklar, tarımsal ürün artıkları ve biyolojik atıklar bulunur. Biyokütle, biyogaz, biyodizel, etanol gibi yakıtların üretiminde kullanılır.

Yenilenebilir enerji kaynakları, fosil yakıtlarla karşılaştırıldığında daha temizdir ve sera gazı salımlarını azaltarak iklim değişikliğiyle mücadelede katkıda bulunabilir [9]. Ancak, bu kaynakların yaygın kullanımında, enerji depolama teknolojilerindeki gelişmeler gibi bazı zorluklar ve engeller bulunmaktadır. Yenilenebilir enerji, sürdürülebilir enerji geleceğinin önemli bir bileşeni olarak kabul edilmektedir.

**Biyokütle Enerjisi:** Biyokütleden enerji veya kimyasallar üretilebilir. Biyokütle, organik maddelerden elde edilen bir enerji kaynağıdır ve genellikle bitki örtüsü, tarım atıkları, odun, ahşap artıkları ve biyolojik atıkları içerir. Biyokütlenin işlenmesinde biyolojik ve termokimyasal yöntemlerle hidrojen üretilebilir. Biyolojik yöntemler olarak adlandırılan biyofotoliz, karanlık fermantasyon ve foto-fermantasyon yöntemleriyle ve termokimyasal yöntemler olarak adlandırılan Piroлиз, Gazifikasyon, Yanma ve Sıvılaştırma yöntemleri ile hidrojen üretilebilir.

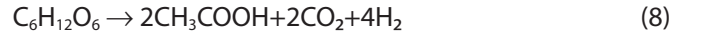
**Biyofotoliz:** Biyofotoliz, doğrudan güneş ışığı kullanarak biyolojik organizmalar tarafından suyun ayrıştırılması sürecidir [10]. Bu süreçte, su, fotoliz yoluyla hidrojen ve oksijen gazlarına ayrıştırılır. Bu işlem, genellikle fotosentez yapan mikroorganizmalar veya yapay olarak tasarlanmış biyolojik sistemler tarafından gerçekleştirilir. Biyofotoliz, genellikle şu iki temel süreçle ilgilidir:

- **Fotosistem II (PSII) ile Su Parçalanması:** Fotosentez sırasında bitkiler, algler ve bazı bakteriler, ışık enerjisi kullanarak su moleküllerini parçalarlar. Bu reaksiyon, fotosistem II (PSII) adı verilen bir protein kompleksi tarafından gerçekleştirilir. PSII, güneş ışığından gelen enerjiyi kullanarak su moleküllerini hidrojen ve oksijen gazlarına ayırır. Elde edilen oksijen atmosfere salınırken, hidrojen genellikle başka tepkimelere katılır.

- **Hidrojen Üretimi:** Biyofotoliz yoluyla elde edilen hidrojen, genellikle hidrojenaz enzimleri tarafından üretilir. Hidrojenaz enzimleri, hidrojen gazını oluşturmak için elektronların ve protonların birleşmesini hızlandırır. Bu hidrojen, daha sonra enerji depolama veya enerji taşıyıcı olarak kullanılabilir. Biyofotoliz, yenilenebilir enerji üretimi ve enerji depolama konularında büyük ilgi çekmektedir. Bu süreç, güneş enerjisini doğrudan hidrojen enerjisine dönüştüren bir yol sunarak, sürdürülebilir enerji üretimine katkı sağlayabilir. Bu alanda yapılan araştırmalar, biyofotolizi daha verimli ve uygulanabilir kılmak için mikroorganizmaların genetik mühendislik ve biyoteknoloji kullanımını içerir.

**Karanlık Fermantasyon:** Mikroorganizmaların organik malzemeleri kullanarak karanlık koşullarda (güneş ışığı olmaksızın) hidrojen üretme sürecidir [11]. Bu yöntem, özellikle bakterilerin veya arkeaların (arkeobakteriler) çeşitli organik substratların (değişime uğrayan molekül veya bileşikler) fermantasyon yoluyla hidrojen ve yan ürün olarak organik asitler ürettiği bir biyolojik süreçtir. Karanlık fermantasyon yöntemi genellikle şu adımları içerir:

- **Substrat Hazırlığı:** Organik malzeme, örneğin glikoz, selüloz, nişasta veya diğer organik maddeler, mikroorganizmalar tarafından kullanılabilir bir forma dönüştürülür.
- **Fermantasyon:** Mikroorganizmalar, organik substratları fermantasyon sürecine sokarlar. Bu süreçte, organik malzemeler metabolize edilerek hidrojen, organik asitler ve diğer yan ürünler oluşur. Kimyasal tepkime şu şekildedir:



Bu tepkimede glikozun fermantasyonu sonucunda asetik asit ve hidrojen üretilir.

- **Hidrojen Üretimi:** Fermantasyon sırasında, mikroorganizmalar tarafından üretilen hidrojen, ortamdaki çıkartılır.

Bu yöntemde, hidrojen üretimi sırasında bir miktar enerji kaybı olabilir ve bu yöntemle elde edilen hidrojen miktarı diğer bazı hidrojen üretim yöntemlerine oranla daha düşük olabilir. Ancak, karanlık fermantasyonun, organik atıkların ve biyolojik malzemelerin değerlendirilmesi gibi üstünlüğü vardır. Ayrıca, bu süreçte mikroorganizmaların kullanılması, biyogaz, biyoplastik ve diğer biyolojik ürünler gibi ek ürünlerin de elde edilebilmesini sağlar. Karan-

lık fermantasyon, sürdürülebilir enerji üretimi ve atık değerlendirilmesi konularında araştırma alanlarından biridir ve bu yöntemin verimliliği ve ekonomik uygulanabilirliği üzerinde çalışmalar sürmektedir.

**Fotofermentasyon:** Mikroorganizmaların ışık enerjisini kullanarak organik maddeleri hidrojen ve diğer yan ürünlere dönüştürdüğü bir biyolojik süreçtir [12]. Bu yöntem, mikroorganizmaların özellikle fotosentetik bakterilerin ve yeşil alglerin katılımıyla gerçekleşir. Işığın varlığında fotosentetik organizmalar, organik maddeleri parçalayarak hidrojen ve karbondioksit üretirler. Fotofermentasyonun genel adımları şunlardır:

- **Organik Malzeme ve Işık Alımı:** Fotosentetik bakteriler veya yeşil algler, organik malzemeleri alır ve güneş ışığını kullanarak enerjiyi emerler.
- **Fotosentez ve Hidrojen Üretimi:** Fotosentetik organizmalar, fotosentez sırasında suyu hidrojen ve oksijen gazlarına ayıran bir dizi kimyasal tepkime gerçekleştirir.



Bu tepkime sırasında hidrojen gazı serbest bırakılır ve ortama yayılır.

- **Hidrojen Ayıklama ve Toplama:** Üretilen hidrojen gazı genellikle organizma tarafından kullanılmaz, sistemden ayrılır ve toplanır. Elde edilen hidrojen gazı, enerji depolama veya enerji taşıyıcı olarak kullanılabilir. Fotofermentasyonun üstün yanları arasında güneş enerjisinin doğrudan kullanılması, organik malzeme kullanılabilirliği ve karbon salımının azaltılması yer almaktadır. Ancak, fotofermentasyonun verimliliği ve uygulanabilirliği üzerinde birkaç zorluk bulunmaktadır. Bu zorluklar şunları içerebilir: Fotosentetik organizmaların fotosentez hızları ve hidrojen üretim verimlilikleri düşük olabilir. Yüksek ışık enerjisi gereksinimi duyabilirler. Ortam koşullarının en uygun düzeyde tutulması gerekebilir.

Bu nedenle, fotofermentasyon süreçlerinin verimliliğini artırmak ve uygulanabilirliğini iyileştirmek için araştırmalar sürmektedir. Bu alandaki çalışmalar, genetik mühendislik, farklı fotosentetik organizmaların kullanımı, reaktör tasarımı ve işlem optimizasyonunu içerebilir.

**Termokimyasal:** Biyokütleden termokimyasal yöntemlerle hidrojen üretimi, biyokütlenin yüksek sıcaklık ve ba-

sınç altında çeşitli kimyasal süreçler uygulanması ile gerçekleştirilir [13]. Biyokütleden termokimyasal yöntemle hidrojen üretimine ilişkin bazı temel süreçler aşağıda verilmektedir.

- **Biyokütlenin Gazlaştırılması (Biomass Gasification):** Bu adım, biyokütlenin yüksek sıcaklık ve oksijensiz ortamda gazlara dönüştürülmesini içerir. Genellikle bu süreçte kullanılan gazlaştırma ajanları arasında su buharı, oksijen ve karbon dioksit bulunmaktadır. Ana çıkış ürünü, hidrojen (H<sub>2</sub>) ile karbon monoksit (CO), metan (CH<sub>4</sub>) ve diğer gazları içeren bir gaz karışımıdır.
- **Su Buharı Gazlaştırma (Steam Gasification):** Biyokütle, bu aşamada yüksek sıcaklıkta su buharı ile tepkimeye sokularak hidrojen ve karbon dioksit üretilen bir gaz karışımına dönüştürülür. Su gazlaştırma, biyokütle içindeki karbonun daha yüksek derecede gazlaştırılmasını sağlar ve bu da hidrojen üretimini artırabilir.
- **Gaz Temizleme (Gas Cleaning):** Gazlaştırma süreçleri genellikle yan ürünler ve katı parçacıklar içerir. Gaz temizleme adımlarıyla, özellikle hidrojenin saflığını artırmak için bu tür yan ürünlerden arındırma işlemi yapılır.
- **Su Gazlaştırma Su Ayırma (Steam Gasification Water-Gas Shift):** Elde edilen gaz karışımı, su gazlaştırma, su ayırma işlemlerinden geçirilir. Bu tepkimede, karbon monoksit (CO), hidrojen (H<sub>2</sub>) ve karbondioksit (CO<sub>2</sub>) dönüşür. Bu adım, son ürünler arasında daha fazla hidrojenin elde edilmesine katkıda bulunur.
- **Hidrojen Ayırma ve Arındırma (Hydrogen Separation and Purification):** Elde edilen gaz karışımı, hidrojenin ayrılması ve arındırılması için işlenir, Gaz karışımından hidrojenin ayrılması ve gerektiğinde diğer gazların uzaklaştırılması sağlanır.

Biyokütleden termokimyasal yöntemle hidrojen üretimi, sürdürülebilir bir enerji kaynağı olan biyokütle kaynaklarından hidrojen elde etmede kullanılabilir. Ancak bu süreçler, yüksek sıcaklıklar ve karmaşık kimyasal tepkimeler içerdiği için teknik ve ekonomik zorluklarla karşılaşabilir. Bu süreçlerin verimliliğini artırmak ve maliyetleri düşürmek için Ar-Ge çalışmaları yapılmaktadır.

**Piroliz:** Hidrojen üretimi için kullanılan bir başka yöntem hidrokarbon pirolizidir. Piroliz, organik malzemelerin (hidrokarbonlar gibi) yüksek sıcaklıkta, oksijensiz bir ortamda ısıl bozunumuna uğramasıdır. Hidrojen üretimi için hidrokarbon pirolizi genellikle şu şekilde gerçekleşir:

- **Hazırlık Aşaması:** Hidrojen üretimi için uygun bir hid-

rokarbon kaynağı genellikle metan (CH<sub>4</sub>) seçilir ve piroliz reaktörüne iletilir.

- **Yüksek Sıcaklıkta Piroliz:** Hidrokarbon gazı, oksijensiz bir ortamda yüksek sıcaklıklarda (genellikle 800 °C ila 1.200 °C arasında) pirolize uğrar. Bu işlem sırasında hidrojen, karbon ve diğer yan ürünler oluşur. Temel piroliz kimyasal tepkimesi şu şekildedir:



- **Yan Ürünler ve Arıtma:** Piroliz sonucunda oluşan gaz karışımı, hidrojenin yanı sıra karbon (kömür), metan, etan, propan, karbon monoksit gibi yan ürünleri içerebilir. Bu gaz karışımından hidrojenin ayrılması ve arıtılması için çeşitli işlemler gereklidir. Hidrojenin diğer gazlardan ayrılması genellikle membran teknolojisi, basınç swing adsorpsiyonu (gaz moleküllerinin katı bir yüzeyin üzerinde veya boşluklarında tutunması) veya soğutma işlemleri gibi yöntemlerle gerçekleştirilir.

Hidrokarbon pirolizinin üstün yanları arasında hidrojen üretiminde yüksek verim, doğal gaz ve biyokütle gibi çeşitli hidrokarbon kaynaklarının kullanılabilmesi bulunur. Ancak, piroliz süreci genellikle yoğun enerji gerektirdiğinden ve karbon salımına yol açtığından, hidrojen üretimi sürecinin sürdürülebilirliği açısından, karbon yakalama ve depolama (CCS) gibi teknolojilerle bütünleştirilmesi veya yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı alternatif hidrojen üretim yöntemleri araştırılmaktadır.

Hidrojenin sürdürülebilir bir enerji taşıyıcısı olarak önemi arttıkça, çeşitli hidrojen üretim yöntemlerinin geliştirilmesi ve iyileştirilmesi için araştırmalar sürmektedir.

**Gazifikasyon:** Gazifikasyon, karbon içeren malzemelerin (örneğin, kömür, biyokütle veya atıklar) yüksek sıcaklık ve basınç altında gazlara dönüştürülmesi işlemidir [14]. Bu gazlar arasında hidrojen, karbon monoksit, metan ve diğer hidrokarbonlar bulunabilir. Gazifikasyon, enerji üretimi, kimya endüstrisi ve yakıt üretimi gibi birçok uygulama alanında kullanılan bir yöntemdir.

Hidrojen üretimi açısından, gazifikasyonun temel amacı, çeşitli ham malzemelerden hidrojen üretmektir. Gazifikasyon süreci, genellikle şu aşamalardan oluşur:

- **Hazırlık Aşaması:** Gazifikasyon süreci için uygun bir ham madde seçilir. Bu genellikle kömür, biyokütle, atıklar veya organik malzemeler olabilir. Ham madde, genellikle küçük parçalara ayrılır veya önceden işlenir.

- **Gazifikasyon Tepkimeleri:** Hazırlanan ham madde, yüksek sıcaklık (genellikle 700 °C ila 1.200 °C) ve basınç altında oksijensiz bir ortamda gazlaştırılır. Bu işlemde gazifikasyon tepkimeleri oluşur ve hidrojen, karbon monoksit ve diğer gazlar üretilir. Genel olarak, gazifikasyon tepkimeleri şu şekildedir:



Burada hidrojen, su buharı ile etkileşim sonucu ortaya çıkar.

- **Gaz Temizleme ve Ayırma:** Elde edilen gaz karışımı, katı parçacıklar, kükürt bileşenleri ve diğer kirleticilerden temizlenir. Ardından, gazların ayrılması için bir dizi işlem uygulanabilir.
- **Hidrojen Ayrılması:** Hidrojen, gaz karışımından ayrılır ve daha sonra depolanabilir veya diğer endüstriyel uygulamalarda kullanılabilir.

Gazifikasyonun üstün yanları arasında farklı ham maddelerin kullanılabilmesi ve hidrojenin yanı sıra diğer enerji taşıyıcılarının üretilmesi de yer almaktadır. Ancak, gazifikasyon süreci, enerji yoğun ve çevresel etkileri olabilen bir süreçtir. Bu nedenle, sürdürülebilirlik ve çevresel etkileri azaltma odaklı gelişmiş gazifikasyon teknolojileri üzerinde çalışmalar sürmektedir.

**Yanma ile Hidrojen Ayırıştırma:** Termokimyasal hidrojen üretimi, yüksek sıcaklıklarda kimyasal tepkimelerin gerçekleştiği bir işlemidir. Bu tür kimyasal tepkimeler genellikle termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarını izleyen endotermik (dışarıdan ısı alan) tepkimelerdir. Termokimyasal hidrojen üretimi için kullanılan bazı yöntemler şunlardır:

**Metan Reformasyonu:** Metan, yüksek sıcaklık ve buharın varlığında hidrojen ve karbon monoksit gibi ürünlere dönüştürülür. Bu işlem genellikle endotermiktir ve enerji sağlamak için dış enerji kaynaklarına gereksinim duyar. Bu enerji, genellikle doğal gaz veya başka bir enerji kaynağından sağlanır.

- **Su Buğulanması (Water Gas Shift - WGS) Reaksiyonu:** Metan reformasyonu aşamasında oluşan gaz karışımındaki karbon monoksit, su buharı ile tepkimeye girerek hidrojen ve karbon dioksit oluşturur. Bu reaksiyon da endotermiktir ve yüksek sıcaklıkta ve genellikle katalizörler kullanılarak yapılır.





- **Sülfür Yakma Reaksiyonu:** Hidrojen sülfür içeren gazların varlığında yüksek sıcaklıklarda gerçekleşen bir kimyasal tepkimeyle üretilebilir. Bu tepkime sırasında sülfür çeşitli bileşiklere dönüşebilir ve çeşitli yan ürünler oluşabilir.
- **Termokimyasal Su Ayrışması:** Yüksek sıcaklıkta su moleküllerinin ısı ayrışması, hidrojen ve oksijen gazlarını serbest bırakır. Bu işlem genellikle endotermiktir ve yüksek sıcaklıklar gerektirir.

Bu termokimyasal işlemler, hidrojen üretimini sağlar, ancak çoğu durumda enerji girişi gerektirir. Bu enerji genellikle fosil yakıtlardan elde edilir, ancak gelecekte sürdürülebilir enerji kaynakları kullanılarak bu işlemlerin karbon ayak izini azaltmak amacıyla çalışmalar sürmektedir.

**Sıvılaştırma ile Hidrojen Üretimi:** Biyokütle termokimyasal sıvılaştırma, biyokütle kaynaklı malzemelerin yüksek sıcaklık ve basınç altında sıvılaştırılarak biyokütle katranı ve biyokütle kömürü gibi ürünlerin elde edildiği bir süreçtir [15]. Bu süreç, biyokütle kaynaklı malzemelerin enerji içeriğini yoğunlaştırmak ve taşınabilir bir biyokütle enerji taşıyıcısı elde etmek amacıyla kullanılır. Biyokütle termokimyasal sıvılaştırma sürecinin temel adımları aşağıda verilmektedir:

- **Biyokütle Hazırlığı:** Biyokütle kaynaklı malzemeler, genellikle odun, tarım atıkları, orman artıkları veya enerji bitkileri gibi organik maddeler, uygun boyutlara getirilir ve genellikle kurutulur.
- **Piroliz:** Biyokütle, yüksek sıcaklık ve oksijensiz ortamda pirolize uğrar. Piroliz, malzemenin ısı parçalanmasıdır ve bu adımda sıvılaştırılabilir organik ürünler ve katı karbon (biyokütle kömürü) üretilir.
- **Gazlaştırma:** Piroliz aşamasında oluşan katı ürünlere (biyokütle kömürü), daha sonra bir gazlaştırma işlemi uygulanır. Bu süreçte, yüksek sıcaklık ve kontrollü oksijen koşullarında biyokütle kömürü gazlara dönüşür. Bu gazlar arasında hidrojen, karbon monoksit ve metan gibi sıvılaştırılabilir gazlar bulunabilir.
- **Sıvılaştırma:** Gazlaştırma aşamasında elde edilen gazlar, soğutulularak sıvılaştırılır. Bu adımda elde edilen sıvı, biyokütle kaynaklı sıvı yakıtlar veya kimyasal ürünler olabilir.

Biyokütle termokimyasal sıvılaştırma, biyokütle kaynaklarının daha yoğun ve taşınabilir bir enerji formuna dö-

nüştürülmesini sağlar. Elde edilen sıvı yakıtlar, biyokütle kaynaklarının enerji içeriğini en iyi duruma getirmek için kullanılabilir veya enerji üretimi, ısıtma ve kimyasal üretim gibi çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılabilir.

**Su Ayrıştırma:** Su elektrolizi, genellikle elektroliz hücresi olarak adlandırılan bir sistem içinde gerçekleşir. Bu hücre, anot ve katot elektrotları arasında elektrolit içeren bir yapıdadır. Elektrolit, iyon taşıma yeteneği sayesinde elektrik akımını kolayca iletir. Bu yöntemin üstünlükleri arasında çevre dostu olması, temiz enerji kaynakları kullanıldığında karbon ayak izinin düşük olması ve yenilenebilir enerji ile kullanılma olasılığının bulunması yer alır. Ancak, su elektrolizinin özellikle enerji yoğun bir süreç olması ve verimliliğinin artırılması gerekliliği gibi bazı olumsuz yanları da vardır. Bu nedenle, sürekli olarak geliştirilmekte olan bir teknolojidir.

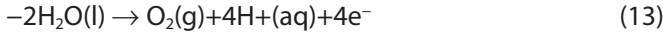
**Elektroliz:** Elektroliz, bir elektrolit içindeki iki elektrot arasında oluşan kimyasal tepkime yoluyla bir maddenin ayrıştırılması işlemidir. Su elektrolizi, bu yöntemin belirli bir uygulamasıdır, ancak elektroliz daha genel bir terimdir [16]. Elektroliz işlemi şu temel bileşenleri içerir:

- **Elektrotlar:** Elektroliz için kullanılan iki elektrot vardır; anot (pozitif elektrot) ve katot (negatif elektrot). Bu elektrotlar iletken malzemelerden yapılır ve genellikle metal veya karbon kullanılır.
- **Elektrolit:** Elektrotlar arasındaki ortamda bulunan elektrolit, iyon taşıma yeteneği olan bir madde olup elektrik akımını iletir. Sıvı halde bulunan elektrolitler genellikle su veya tuz çözeltisi olabilir.
- **Elektrik Akımı:** Bir dış kaynaktan sağlanan elektrik akımı, elektrotlar arasından elektrolize uğrayan maddeye (elektrolit) iletilir. Elektrik akımı, elektrolitin içindeki iyonları taşıyarak tepkimenin gerçekleşmesini sağlar.
- **Redoks Tepkimeler:** Elektroliz sırasında, elektrotlarda redoks (indirgeme-oksidasyon) tepkimeleri gerçekleştiğinden, elektrotlardan veya elektrolit içindeki maddeden elektron taşınması olur.
- **Ayrışma ve Ürün Oluşumu:** Elektroliz sonucunda elektrotlarda veya elektrolit içindeki maddelerde kimyasal değişiklikler ve hedeflenen ürünler oluşur. Örneğin, su elektrolizinde, hidrojen ve oksijen gazları üretilir.

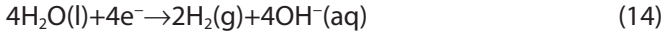
Elektroliz, çeşitli endüstriyel uygulamalarda ve laboratuvar deneylerinde kullanılır. Örnekler arasında metallerin

rafine edilmesi, kimyasal ürünlerin sentezi, su arıtma, elektrokimyasal sentez ve hidrojen üretimi gibi uygulamalar bulunmaktadır. Su elektrolizi, hidrojen üretimi amacıyla suyun hidrojen ve oksijene ayrıştırılması anlamına geldiğinden, su elektrolizi özel bir elektroliz uygulamasıdır. Bu yöntem, özellikle temiz enerji kaynaklarına dayalı sürdürülebilir enerji üretimi amacıyla giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Su elektrolizi, elektrik akımının su moleküllerini hidrojen (H<sub>2</sub>) ve oksijen (O<sub>2</sub>) olarak ayırmak için kullanıldığı bir kimyasal süreçtir. Bu işlem genellikle "su elektrolizi" olarak adlandırılır ve bu reaksiyon genellikle anot ve katot yarı hücresinde meydana gelir:

- *Anot Yarı Hücresi:* Su molekülleri, anot (pozitif elektrot) üzerinde oksitlenir. Oksidasyon tepkimesi şu şekildedir:



- *Katot Yarı Hücresi:* Elektronlar, katot (negatif elektrot) üzerinde su moleküllerini hidrojene indirir. İndirgeme tepkimesi şu şekildedir:



Bu iki yarı hücredeki kimyasal tepkimeler birleştiğinde, tepkime şu şekilde gösterilir:



Bu işlem, saf suyun hidrojen ve oksijen gazlarına ayrılmasını sağlar ancak, pratikte kullanılan sular genellikle çeşitli mineraller ve iyonlar içerdiğinden, yan ürünlerin oluşumuna da neden olabilir.

**Termoliz:** Suyun termoliz ile ayrıştırılması, yüksek sıcaklıklarda su moleküllerinin ayrıştırılarak hidrojen (H<sub>2</sub>) ve oksijen (O<sub>2</sub>) gazlarının elde edilmesi anlamına gelir [17]. Bu işlem genellikle şu şekilde gösterilir:



Bu işlem, su moleküllerinin ısı etkisiyle parçalanarak hidrojen ve oksijen gazlarına ayrılmasını belirtir ancak, genellikle çok yüksek sıcaklıklarda gerçekleşir ve enerji yoğun bir süreçtir. Bu nedenle, suyun termolizi genellikle pratik bir hidrojen üretme yöntemi olarak kullanılmaz. Suyun termoliz ile ayrıştırılması için genellikle çok yüksek sıcaklıklar gereklidir (örneğin, 2.000 °C ve üzeri). Bu sıcaklıkların elde edilmesi, enerji maliyetlerini artırdığından, daha düşük enerji maliyetli başka hidrojen üretim yöntemleri (örneğin su elektrolizi) daha çok kullanılır.

Suyun termolizi, laboratuvar deneylerinde veya belirli endüstriyel uygulamalarda kullanılabilecek bir teorik kavramdır. Hidrojen üretimi için çoğunlukla daha etkili ve ekonomik yöntemler, örneğin, su elektrolizi gibi suyun yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik akımı kullanılarak ayrıştırılması yöntemleri daha yaygındır ve çevre dostu olarak kabul edilir.

**Fotoliz:** Suyun fotolizi, ışığın etkisi altında su moleküllerinin hidrojen ve oksijen gazlarına ayrıştırılması işlemidir. Bu işlem, suyun güneş ışığı gibi bir enerji kaynağı tarafından uyarılmasıyla gerçekleşir. Genel olarak şu şekilde gösterilir:



Bu denklemden hv, suyun fotoliz reaksiyonunu başlatan ışık enerjisini (genellikle güneş ışığı) gösterir. Fotoliz reaksiyonu genellikle iki aşamada gerçekleşir:

- *Fotokimyasal Aşama:* Güneş ışığı, su moleküllerine enerji sağlayarak suyun parçalanmasını sağlar. Bu aşamada su, bir elektronunu kaybeder ve bir oksijen molekülünü serbest bırakır. Serbest bırakılan elektron, başka bir su molekülüne taşınarak hidrojen gazını serbest bırakır.
- *Elektrokimyasal Aşama:* Oluşan hidrojen ve oksijen gazları serbest bırakılır. Bu gazlar ayrı ayrı toplanabilir ve kullanılabilir. Fotoliz, özellikle güneş enerjisinin kullanıldığı uygulamalarda sürdürülebilir hidrojen üretimi için umut veren bir yöntemdir. Ancak, bu süreç, şu ana kadar ticari ölçekte yaygın bir şekilde kullanılmamıştır ve araştırma aşamasındadır. Fotolizin verimliliği, ışığın emilimi, elektron ve proton transfer mekanizmaları gibi etkenlere bağlıdır ve bu nedenle en iyi duruma getirilmesi gereken birçok değişken içerir.

Bu alandaki araştırmalar, fotoliz yönteminin geliştirilmesi ve etkinleştirilmesi üzerine odaklanmakta olup, sürdürülebilir enerji kaynaklarına dayalı olarak hidrojen üretiminde gelecekte önemli bir rol oynaması umulmaktadır.

Biyokütle, rüzgâr, güneş gibi diğer hidrojen üretim seçenekleri ele alındığında, su elektrolizi için kullanılan elektriğin, hidrojen üretimi için verim kaybı yarattığı görülmüştür [18]. Bu nedenle, en bol ve yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisinin hidrojen üretiminde doğrudan kullanılmasına yönelik çalışmalar artış göstermektedir. Güneş enerjisiyle hidrojen üretimi için en

güncel çalışılan yöntemler arasında fotoelektrokimyasal su ayrışması (PEC), fotokatalitik su ayrışması (PC), fotovoltai-kimyasal su ayrışması (PV-EC), fotobiyolojik (PB), solar termokimyasal (STC), fosil yakıtlardan foto-termal-katalitik (PTC) H<sub>2</sub> üretimi yer almaktadır [19,20]. Su ayrıştırma ile solar bazlı hidrojen üretimi süreçlerinin temel ilkeleri, üstün ve zayıf yanları, kullanımını artırma konusundaki temel hedefler, verimlilik ve maliyet konusu farklılık göstermektedir. CCUS teknolojileri ile birlikte fosil yakıtlardan hidrojen eldesi ve elektrolizör kullanımının geliştirilmesi ile 2030 yılında 20 Mt düşük salımlı hidrojen üretimi gerçekleştirilebileceği öngörülmektedir [1].

Yeşil hidrojen üretiminde elektrolizör için gerekli olan elektrik, yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanmaktadır. Özellikle günümüzde fotovoltai hücreler ile bütünleşmiş elektrolizör sistemlerinin yanı sıra fotovoltai-kimyasal su ayrıştırma yöntemi, yeni nesil teknoloji olarak dikkat çekmektedir.

Geleneksel elektrolizör teknolojisi, doğrudan elektrik akımının etkisiyle redoks tepkimesi sonucunda suyun H<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> olarak ayrılma işlemidir. Kimyasal tepkime aşağıda verilmiştir:



Elektrot malzemeleri, çalışma sıcaklıkları, reaksiyon kinetiği ve basınç farklarından dolayı endüstriyel süreçlerde kullanım alanına bağlı olarak elektroliz çeşitleri bulunmaktadır. Bu farklılıklar, elektrolizin enerji verimliliğini, dayanıklılığını ve maliyetini etkilemektedir [21]. Elektroliz işlemleri; rüzgâr, biyokütle ve güneş gibi temiz enerji kaynaklarından sağlanan doğru akım (DC) şeklinde kullanılır. Ancak ekonomik sınırlamalar nedeniyle su elektrolizi yalnızca üretilen H<sub>2</sub>'nin %4'ünü oluşturmaktadır [22].

Fotovoltai-kimyasal su ayrıştırma yönteminde (PV-EC) doğrudan hidrojen üretimi için fotovoltai hücre ve elektrolizör olmak üzere iki ana bölüm gereklidir. Elektrik üretimi için solar enerjiyi emen fotovoltai hücre (PV), doğrudan elektrolizöre bağlanılarak suyun anot ve katoda, H<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> olarak ayrılmasını sağlar [19,23]. PV hücreleri anot ve katoda, elektrolitin dışında bağlı olmasından dolayı sudan kaynaklanan korozyon önlenmiş olur [19,23]. Fotovoltai hücrelerin çeşitli malzeme yapılandırmaları ile iyileştirmeler yapılmaktadır [23-25]. Fotovoltai (PV) tabanlı hidrojen üretiminin yüksek kurulum maliyetleri, fosil yakıtlara göre düşük verimliliği ve güneş enerjisinin yalnızca gündüz vakitlerinde olduğu yerlerde erişilebilirli-

ği zayıf noktalar olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle depolama teknolojileri ve farklı yenilenebilir enerji kaynakları ile bütünleştirilmiş hibrit sistemler, bu olumsuzlukları ortadan kaldıracak çözümler üretebilir [26].

Diğer güneş tabanlı hidrojen üretim yöntemleri için fotokatalitik su ayrıştırma yönteminde güneşten gelen fotonik enerjinin, yarı iletken malzemeler sayesinde kimyasal enerjiye dönüştürülmesi sağlanır [19,27].

Fotokatalizör, bant aralığını aşan enerjili fotonları emdiğinde oksidasyon ve indirgenme tepkimeleri için elektron-boşluk çiftleri oluşturarak H<sub>2</sub> üretimi gerçekleştirilir [19,27].

Fotokatalizör seçimlerinde elektron-boşluk çiftlerinin hızlı bir şekilde oluşturulması ve ayrılması önemlidir [19,28]. Aynı zamanda fotokatalizörün suyu ayrıştırarak hidrojen üretmesi için uygun bir enerji bant aralığına, oksidasyon/indirgenme tepkimeleri için uygun konumlandırılmış iletken bantlarına (CB) ve değerlik bantlarına (VB) gerek duyulur. Termodinamik sınırlamalar kapsamında fotokatalizörün su ayrıştırma yapısını gerçekleştirebilmesi için, hidrojen dönüşüm tepkimesinin (HER) (H<sup>+</sup>/H<sub>2</sub>, 0 V) sahip olduğu potansiyel enerjisinden daha düşük (en düşük) iletken bandına (CBM) ve oksijen dönüşüm tepkimesinin (OER) (O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O, +1,23V) potansiyel enerjisinden daha yüksek (en yüksek) bant değeri olan yarı iletken kullanılmalıdır [19,29]. Dar bir enerji bant aralığı olan yarıiletken, güneş ışığını daha yüksek oranda emer ve kullanır; daha geniş bir enerji bant aralığında olan yarıiletken ise daha güçlü oksidasyon veya indirgeme yeteneğindedir.

#### 4. SONUÇLAR

Bu yazıda, kaynaklarda yer verilen hidrojen üretim yöntemleri genel olarak anlatılmış, özellikle solar bazlı hidrojen üretim yöntemleri açıklanmıştır. Hidrojen üretiminde çevre kirliliğine yol açmayan ve sıfır salımlı (Net Zero) sistemler oldukça dikkat çekicidir. Son yıllarda net sıfır hedefleri amacıyla, CO<sub>2</sub> salımlarının azaltılması yönünde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması özendirilerek, hidrojenin fosil yakıtlardan üretimi konusundaki çalışmalar da sürdürülmektedir. Yenilenebilir enerji kaynağı olarak güneş, hidrojen üretiminde son derece önemlidir ve önümüzdeki yıllarda da geliştirilmesi amacıyla araştırmalar sürdürülecektir. Fotovoltai-kimyasal su ayrıştırma yöntemi her ne kadar kolay ölçeklenebilir, ticari olarak uygun ve uzun ömürlü yapılı olsa da fotovoltai hücre

üretimi için yüksek çevresel etkisi vardır. Tüm yöntemler değerlendirildiğinde, fotokatalitik su ayrıştırma, solar bazlı hidrojen üretim işlemleri arasında en ideal yöntem olduğu söylenebilir. Ancak katalizör sentezi için pahalı hammadde, güneş enerjisinden hidrojene dönüşümde düşük verimlilik, nanomalzemelerin çevresel etkisi, malzemelerin yeniden kullanımındaki zorluk gibi sorunlar ile karşılaşılmamasından dolayı araştırmacılar birçok konu üzerinde hâlâ çalışmaktadır. Metan veya buhar reformasyonu, endüstriyel ölçekte yaygın olarak kullanılan bir hidrojen üretim yöntemi olmakla birlikte, gelecekte daha sürdürülebilir ve çevre dostu hidrojen üretim yöntemlerine yönelik araştırmalar ve geliştirmeler de yapılmaktadır.

## KAYNAKÇA

1. International Energy Agency (IEA). Global Hydrogen Review 2023, 2023.
2. **Yukesh Kannah R., Kavitha S., Preethi, Parthiba Karthikeyan O., Kumar G., Dai-Viet N.V., et al.** 2021. Techno-economic assessment of various hydrogen production methods: A review. *Bioresour Technol*;319:124175.
3. **Megia, P.J., Vizcaino, A.J., Calles, J.A., ve Carrero, A.** 2021. Hydrogen Production Technologies: From Fossil Fuels toward Renewable Sources. A Mini Review. *Energy Fuels*;35, 20, 16403-16415.
4. **Chen, H.L., Lee, H.M., Chen, S.H., Chao, Y. ve Chang, M.B.** 2008. Review of plasma catalysis on hydrocarbon reforming for hydrogen production-Interaction, integration, and prospects. *Applied Catalysis B: Environmental*;85, Issues1-2, Pages 1-9.
5. **Amiri, T.Y., Ghasemzageh, K. ve Iulianelli, A.** 2020. Membrane reactors for sustainable hydrogen production through steam reforming of hydrocarbons: A review. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*; 108148.
6. **Nikolaidis, P. ve Poullikkas, A.** 2017. A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*;67, 597-611.
7. **Tariq, R., Maqbool, F. ve Abbas, S.Z.** 2021. Small-scale production of hydrogen via auto-thermal reforming in an adiabatic packed bed reactor: Parametric study and reactor's optimization through response surface methodology. *Computers & Chemical Engineering*;145, 107192.
8. **Schneider, S., Bajohr, S., Graf, F. ve Kolb, T.** 2020. State of the art of hydrogen production via pyrolysis of natural gas. *Chem-BioEng Rev*;7, No. 5, 150-158.
9. International Energy Agency (IEA). *Technology Roadmap: Hydrogen and Fuel Cells*; IEA: Paris, France, 2015.
10. **Dincer, I.** 2012. Green Methods for Hydrogen Production. *Int. J. Hydrogen Energy*, 37 (2), 1954-1971.
11. **Bundhoo, ZMA.** 2019. Potential of bio-hydrogen production from dark fermentation of crop residues: A Review. *Int. J. Hydrogen Energy*; 44 (32), 17346-17362.
12. **Argun, H. ve Kargi, F.** 2011. Bio-hydrogen production by different operational modes of dark and photo-fermentation: An Overview. *Int. J. Hydrogen Energy*; 36, 7443-7459.
13. **Hossain, M. A., Jewaratnam, J. ve Ganesan, P.** 2016. Prospect of hydrogen production from oil palm biomass by thermochemical process-A review. *Int. J. Hydrogen Energy*;41 (38), 16637-16655.
14. **Boujjat, H., Rodat, S. ve Abanades, S.** 2021. Techno-economic assessment of solar-driven steam gasification of biomass for large-scale hydrogen production. *Processes* 2021; 9 (3), 462.
15. **Gollakota, ARK., Kishore, N. ve Gu, S.** 2018. A review on hydrothermal liquefaction of biomass. *Renewable Sustainable Energy Rev.*; 81, 1378-1392.
16. **Schmidt, O., Gambhir, A., Staffell, I., Hawkes, A., Nelson, J. ve Few, S.** 2017. Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study. *Int. J. Hydrogen Energy*; 42 (52), 30470-30492.
17. **Abanades, S.** 2019. Metal oxides applied to thermochemical water-splitting for hydrogen production using concentrated solar energy. *ChemEngineering*; 3 (3), 63.
18. **Tentu RD. ve Basu S.** 2017. Photocatalytic water splitting for hydrogen production. *Current Opinion in Electrochemistry*;5:56-62.
19. **Song H., Luo S., Huang H., Deng B. ve Ye J.** 2022. Solar-Driven Hydrogen Production: Recent Advances, Challenges, and Future Perspectives. *ACS Energy Letters*;7:1043-65.
20. **Chen S., Takata T. ve Domen K.** 2017. Particulate photocatalysts for overall water splitting. *Nature Reviews Materials*; (2), 17050
21. **El-Emam RS. ve Özcan H.** 2019. Comprehensive review on the techno-economics of sustainable large-scale clean hydrogen production. *Journal of Cleaner Production*;220:593-609.
22. **Qureshi F., Yusuf M., Arham Khan M., Ibrahim H., Ekeoma BC., Kamyab H., et al.** 2023. A State-of-The-Art Review on the Latest trends in Hydrogen production, storage, and transportation techniques. *Fuel*;340:127574.
23. **Zhao H. ve Yuan ZY.** 2023. Progress and Perspectives for Solar-Driven Water Electrolysis to Produce Green Hydrogen. *Advanced Energy Materials*;13:2300254
24. **Li Z., Fang S., Sun H., Chung R.J., Fang X. ve He JH.** 2023. Solar Hydrogen. *Advanced Energy Materials*;13. 2203019
25. **Jia J., Seitz LC., Benck JD., Huo Y., Chen Y., Ng JWD., et al.** 2016. Solar water splitting by photovoltaic-electrolysis with a solar-to-hydrogen efficiency over 30%. *Nature Communications*;7:13237
26. **Sarker AK., Azad AK., Rasul MG. ve Doppalapudi AT.** 2023. Prospect of Green Hydrogen Generation from Hybrid Renewable Energy Sources: A Review. *Energies*;16:1556.
27. **Acar C., Dincer I. ve Naterer GF.** 2016. Review of photocatalytic water-splitting methods for sustainable hydrogen production. *International Journal Of Energy Research*;40:1449-73.
28. **Tahir M., Tasleem S. ve Tahir B.** 2020. Recent development in band engineering of binary semiconductor materials for solar-driven photocatalytic hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*;45:15985-6038.
29. **Yuan L., Han C., Yang MQ. ve Xu YJ.** 2016. Photocatalytic water splitting for solar hydrogen generation: fundamentals and recent advancements. *International Reviews in Physical Chemistry*;35:1-36.