



Producing Hydrogen Gas from Organic Wastes Released by Agricultural Activities[#]

Furkan Baş^{1,2,a}, Burak Şen^{1,b}, Mehmet Fatih Kaya^{2,c,*}

¹Biosystem Engineering Department, Faculty of Agricultural Sciences and Technologies, Niğde Ömer Halisdemir University, 51240 Niğde, Turkey

²Heat Science and Technique Department, Faculty of Engineering, Energy Systems Engineering, Erciyes University, 38039 Kayseri, Turkey

*Corresponding author

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p><i>This study was presented as an oral presentation at the 5th International Anatolian Agriculture, Food, Environment and Biology Congress (Tokat, TARGID 2020)</i></p> <p>Review Article</p> <p>Received : 06/10/2020 Accepted : 24/11/2020</p> <p>Keywords: Electrolysis Energy Energy in agriculture Hydrogen Organic waste</p>	<p>The world's population is increasing day by day, and the need of the energy and food is increasing at the same rate. As it is known, facilities which engaged in agricultural activities take a large share of the world's industrial pie, so the pollution sparked by the activities of these industries is also uncondescending. Energy production from organic wastes exposed as a result of agricultural activities is an important working area; damage to the environment will also be reduced by the recovery of the wastes. In this study, hydrogen gas production from organic wastes released by agricultural activities will be demonstrated. In addition, literature review on the state of hydrogen energy from organic wastes in the world and in Turkey will be carried out.</p>

Türk Tarım – Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi, 8(sp1): 54-61, 2020

Tarımsal Faaliyetlerden Kaynaklanan Organik Atıklardan Hidrojen Gazı Elde Edilmesi

MAKALE BİLGİSİ	ÖZ
<p>Derleme Makale</p> <p>Geliş : 06/10/2020 Kabul : 24/11/2020</p> <p>Anahtar Kelimeler: Elektroliz Enerji Hidrojen Organik atık Tarımda Enerji</p>	<p>Gün geçtikçe artan dünya nüfusunun aynı oranda enerjiye ve besine olan ihtiyacı da artmaktadır. Bilindiği üzere tarımsal faaliyetler gösteren işletmeler, dünyanın endüstri pastasından büyük bir pay almaktadır, bu yüzden bu endüstrilerin faaliyetleri sonucu ortaya çıkan kirlilikler de küçümsenemeyecek seviyededir. Tarımsal faaliyetler sonucu açığa çıkan organik atıklardan enerji üretimi ise önemli bir çalışma alanı olmakla birlikte; bu atıkların geri kazanımı ile çevreye verilen zarar da indirgenmiş olunacaktır. Bu yüzden önerilen çalışmada, tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan organik atıklardan hidrojen gazı elde edilmesi ve hidrojen teknolojisi üzerinde durulmuştur. Ayrıca, dünyada ve Türkiye'de organik atıklardan hidrojen enerjisinin üretim ve kullanım durumu incelenmiştir.</p>

^a furkanbas@ohu.edu.tr
^c kayamehmetfatih@erciyes.edu.tr

^b <http://orcid.org/0000-0002-1312-6871>
^c <http://orcid.org/0000-0002-2444-0583>

^b bsen@ohu.edu.tr ^d <http://orcid.org/0000-0001-8105-1106>



Giriş

Dünyanın enerji ihtiyacı da artan nüfus ile birlikte hızla artmaktadır. Enerji talebindeki bu artış ve fosil yakıtların hızla tükeniyor olması, alternatif enerji kaynaklarına olan yönelimin artmasına sebep olmuş bu nedenle yeni enerji alanlarına yönelimler hızlanmıştır (Carvalho, 2013, Azbar, 2009; Xin Mei Guo, 2010). Günümüzde birçok endüstri doğaya farklı atıklar bırakmaktadır ve bu atıklar çoğu zaman doğaya ciddi zararlar vermektedir. Bu anlamda endüstri atıklarının değerlendirilmesi, geri dönüştürülmesi, çevreye vereceği zararların minimuma indirilmesi ve mümkünse bu atıklardan enerji veya enerji kaynağı üretilmesi büyük bir önem arz etmektedir. Böylece hem yerli kaynaklardan enerji üretimi gerçekleştirilebilir hem de doğaya verilen zararlar indirgenebilir. Bu enerjinin ise hidrojen üretilmesi çok ilgi çeken ve gelişime açık bir alandır. Geçmiş yıllarda yapılan bir araştırmaya göre; tarımsal aktivitelerden kaynaklanan emisyon salınımı, global olarak %10-12 oranındadır ve 2030 yılına kadar bu değer %6'dan fazla artış olması beklenmektedir (Fiel, 2009). Şekil 1'de TÜİK verilerine göre 2018 yılında Türkiye için sektörler bazında sera gazı emisyon değerleri verilmiştir (TÜİK, 2018).

Şekil 1'de görüldüğü üzere Türkiye'de en çok sera gazı salınımı gerçekleştiren sektörlerin başında enerji üretim, sanayi ve tarım gelmektedir. Tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan atıklar organik atık olarak adlandırılmaktadır. Organik atıklar çevreye salındığında doğaya ve canlı yaşamına zarar verdikleri bilinmektedir. Bu zararlar organik atığın aşağıda sıralanan özellikleri sebebiyle meydana gelmektedir;

- Alkali eksikliği
- Yüksek oranda bakteri miktarı
- Asitlenmeye eğilimli olması
- Yüksek organik içerik
- pH değerinin düşük, yani asidik olması
- Yüksek oksitlenme seviyesi sebebiyle doğa ve canlı yaşamı için zararlı olduğu ortaya konmuştur (Ergüder ve ark., 2001, Frigon ve ark., 2009; Diamantis ve ark., 2018).

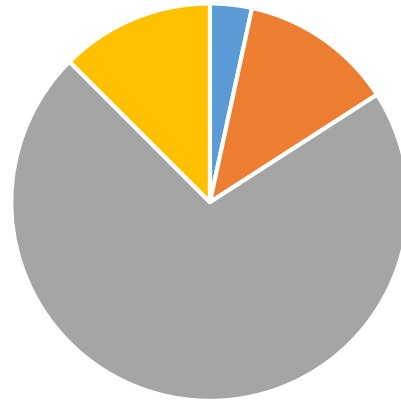
Tarım sektöründen oluşan atıklardan enerji veya enerji kaynağı üretmek ve mümkünse bu işlem için alternatif veya temiz enerji ve enerji kaynaklarına yönelmek çok önemlidir. Şekil 2'de Türkiye'de 2019 nisan ayında üretilen enerji miktarı ve enerji türleri gösterilmiştir (Karakış, 2019).

Şekil 1 ve Şekil 2'deki veriler incelendiğinde, tarım sektöründen kaynaklanan yüksek miktarda organik atığa rağmen, bu atıklardan yani biyokütleden üretilen enerji miktarı çok düşüktür. Bu bilgiler ışığında biyokütleden enerji ve enerji kaynağı üretebilmek ülkemiz açısından önemli bir çalışma alanı sunacaktır. Bu bağlamda ülkemizde biyokütle enerjisi incelendiğinde (BEP, 2020) Şekil 3, Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6'da verilen haritalara ulaşılmıştır. Şekil 3'te verilen Enerji İşleri Genel Müdürlüğü verilerine göre Türkiye'de İstanbul, Ankara, Niğde, Hatay ve Mersin illerinde biyokütleden, biyodizel üretimi yapılmaktadır. Biyodizel, bitkisel ve hayvansal yağların, bir katalizör eşliğinde, kısa zincirli bir alkol ile reaksiyona girmesi sonucu ortaya çıkan üründür. Herhangi bir dizel yakıt ile karıştırılarak içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılabilir (YEGM, 2020).

Şekil 4'de görüldüğü üzere; Enerji İşleri Genel Müdürlüğü verilerine göre Türkiye'de Çanakkale, Eskişehir, Konya, Adana, Malatya illerinde biyokütleden, biyoetanol üretimi yapılmaktadır. Biyoetanol, nişasta ve selüloz bazlı atıkların fermantasyonu sonucu elde edilen, benzine belirli bir oranda karıştırıldığında oktan ve motorun performansında artışı sağlayan bir üründür (YEGM, 2020).

Şekil 5 incelendiğinde Bursa, Manisa, Aydın, Mersin ve Nevşehir illerinde lisanssız santraller tarafından biyokütle kullanılarak yüksek miktarlarda enerji üretimi gerçekleştirildiği görülmektedir. Buna ek olarak Türkiye geneline bakıldığında Orta Anadolu bölgesinde birçok ilde lisanssız olarak biyokütleden enerji üretilmektedir. Lisanssız santraller daha çok yerli halk tarafından kendi ihtiyaçlarını karşılamak üzere belirli bir bölge, hane veya işletme tarafından kullanılmaktadır.

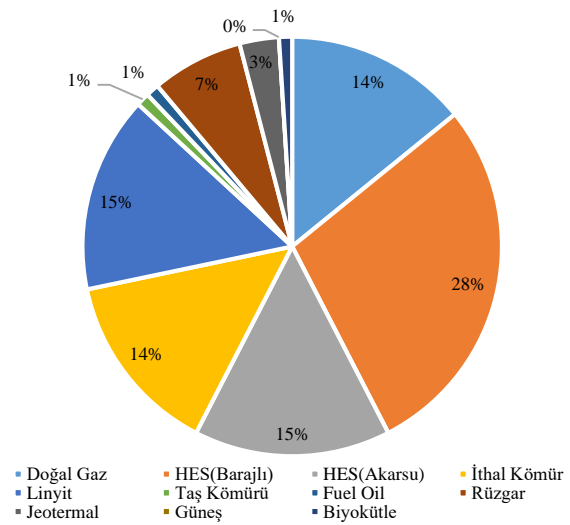
Şekil 5'te Türkiye'de biyokütleden enerji üreten lisanssız santraller (kWe) gösterilmiştir.



• Atık • Tarım • Enerji • Endüstriyel İşlemler ve Ürün Kullanımı

Şekil 1. Türkiye sektörler bazında sera gazı emisyonu (TÜİK, 2018)

Figure 1. Greenhouse gas emissions in Turkey



Şekil 2. Türkiye 2019 nisan ayı enerji üretim miktarı ve enerji türleri (Karakış, 2019)

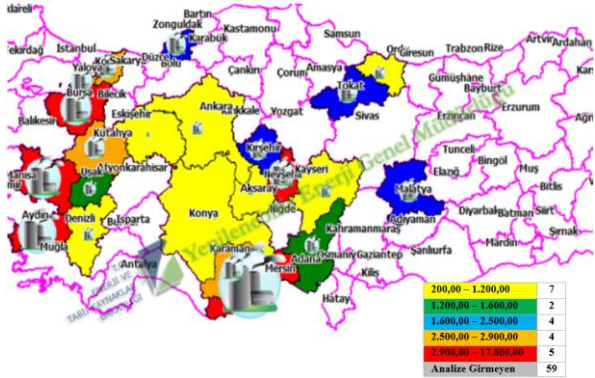
Figure 2. Turkey 2019 April energy production and Energy



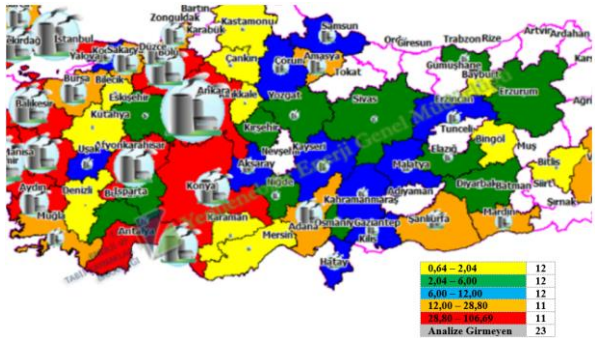
Şekil 3. Türkiye’de Biyodizel Üretimi Yapılan İller ve İşletmeler (BEPA, 2020)
Figure 3. Provinces and Facilities Produced Biodiesel in Turkey



Şekil 4. Türkiye’de Biyoetanol Üretimi Yapılan İller ve İşletmeler (BEPA, 2020)
Figure 4. Provinces and Facilities Producing Bioethanol in Turkey



Şekil 5. Türkiye’de Biyokütleden Enerji Üreten Lisanssız Santraller (kWe) (BEPA, 2020)
Figure 5. Unlicensed Power Plants producing energy from Biomass in Turkey (kWe)



Şekil 6. Türkiye’de Biyokütleden Enerji Üreten Lisanslı Santraller (MWe)
Figure 6. Licensed Power Plants Producing Energy from Biomass in Turkey (MWe)

Şekil 6’da Türkiye’de biyokütleden enerji üreten lisanslı santraller (MWe) verilmiştir.

Şekil 6 incelendiğinde Türkiye genelinde lisanslı işletmeler tarafından biyokütleden enerji üretimi gerçekleştirildiği görülmektedir. Birkaç şehirde ise biyokütleden enerji üretimi yapan büyük santrallerin olduğu Şekil 6’da görülmektedir.

Şekil 5 ve Şekil 6’da veriler incelendiğinde Türkiye’de biyokütlenin enerji kaynağı ve enerji üretimi için kullanıldığı görülsede genel tabloya bakıldığında az bir oranı oluşturmaktadır. Şekil 5 ve Şekil 6’da verilen bilgilere ek olarak biyokütleden hidrojen gazı ve enerjisi de üretmek mümkündür. Biyokütle kullanılarak elde edilen hidrojene biyo-hidrojen denilmektedir (Genç, 2011). Hidrojen ve hidrojen enerjisine olan yönelim hem dünyada hem de ülkemizde yıllar geçtikçe artmaktadır ve bu artış hidrojen enerjisinin avantajları ve geniş çalışma alanları nedeniyle meydana gelmektedir (Jardan ve ark., 2008, Singh ve ark., 2010, Kaldellis ve ark., 2007). Aşağıda Şekil 7’de dünyada yıllara göre üretilen hidrojen miktarı gösterilmiştir (Neuman,2001). Aşağıda Şekil 7 incelendiğinde, güncel verilere göre 2020 yılında 0,5 Mt/y değerinde bir hidrojen üretimi söz konusu olduğu görülmektedir. Yine Şekil 7’de görülebileceği gibi hidrojen üretiminin 2030 yılına kadar düzenli olarak artması ve 2030 yılına gelindiğinde dünya çapında 8 Mt/y değerinde hidrojen üretimi beklenmektedir. Ancak hedeflenen miktarlarda hidrojeni elde edebilmek için üzerinde çalışılması gereken önemli konular bulunmaktadır, bu bağlamda hidrojen elde etme yöntemleri ve hidrojeni depolama konuları hala geliştirilmekte olan alanlardır (Grigoriev ve ark., 2006, Veziroğlu ve ark., 2008, Mazloomi ve ark., 2012). Hidrojen gazını elde etmek için birçok yöntem ve metot bulunmaktadır, bu yöntem ve metotlar aşağıda sıralanmıştır (Dincer ve Acar, 2015):

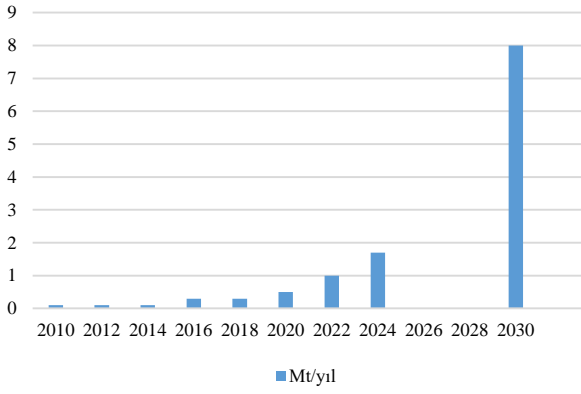
- Elektroliz
- Termoliz
- Termokimyasal İşlemler
- Fotokataliz
- Fotoelektroliz
- Fotoelektrokimyasal Metotlar
- Karanlık Fermantasyon
- Biyokütle

Son yıllarda hidrojen enerjisine olan yönelim nedeniyle, hidrojen gazını daha kolay ve yüksek verimle elde etmek üzerinde deneysel ve teorik çalışmalar artmış ve elektroliz işlemi bu çalışmalar sonucunda diğer yöntemlere kıyasla daha fazla ön plana çıkmıştır. Elektroliz işleminin temel avantajları arasında yüksek saflıkta hidrojen üretimi vardır (Ergüder, 2001; Kaya ve ark., 2017; Kaya ve ark., 2020). Elektroliz işleminin organik atıklara uygulanması sonucu ise hidrojen gazı elde edilebileceği görülmüş ve yapılan çalışmalarda farklı farklı organik atıklara elektroliz işlemi uygulanarak hidrojen gazı üretimi gözlemlenmiştir. Bu çalışmaya ait değerler aşağıda Tablo 1’de verilmiştir (Guo, 2010).

Batch Reaktörler: Sabit hacim şartlarında, uzun reaksiyon zamanı gerektiren işlemlerde kullanılan reaktörlerdir. Organik maddelerin reaksiyona sokulmasıyla ürün olarak elde edilen çıktılar kimyasal madde üretiminde, ilaç üretiminde ve biyokimya alanında kullanılabilir (Neuman, 2001).

Tablo 1. Farklı organik atıkların Hidrojen üretim potansiyelleri (Guo, 2010)
 Table 1. Hydrogen production potentials of different organic wastes (Guo, 2010)

Madde (1 m ³)	Maksimum üretim (mL H ₂ gVS ⁻¹)	Ön arıtma	Sıcaklık(°C)	Reaktör
Mısır samanı	9	–	35	Batch
Mısır samanı	68 ^a	1,5MPa,10 dk	35	Batch
Mısır samanı	49 ^a	220°C 3 dk	35	Batch
Mısır samanı	66 ^a	%1,2 HCl + 200°C 1 dk	35	Batch
Mısır sapı	3	–	36	Batch
Mısır sapı	57	0,5% NaOH	36	Batch
Mısır sapı	150	%0,2 HCl Haşlanmış,30 dk	36	Batch
Çim silajı	6	–	35	Batch
Çim silajı	16	–	70	Batch
Mısır yaprakları	18	–	70	Batch
Mısır yaprakları	42	130°C 30 dk	70	Batch
Pirinç kepeği	61	n.d.	35	Batch
Tatlı sorgum bitkisi	32,4 ^a	130°C 30 dk	70	Batch
Şeker kamışı	19,6 ^a	130°C 30 dk	70	Batch
Buğday samanı	1	–	36	Batch
Buğday samanı	68	HCl %2 + mikrodalga ısıtma	36	Batch
Buğday samanı	49 ^a	130°C 30 min	70	Batch
Buğday kepeği	43	n.d.	35	Batch
İnek dışkısı ve idrar	18 ^a	–	75	Batch
İnek dışkısı ve idrar	29 ^a	–	60	Batch
İnek dışkısı ve idrar	0,7 ^a	–	37	Batch
Sığır gübresi	65	90°C 3 h	52	Batch
Sığır atıksuları	53 ^a	–	45	Batch
Süt gübresi	18	% 0,2HCl Haşlanmış 30 Dk	36	Batch
Süt gübresi	14	%0,2 NaOH Haşlanmış 30 dk	36	Batch
Süt gübresi	14	Kızılötesi radyasyon 2 saat	36	Batch
Domuz bulamacı	4	–	70	CSTR
Domuz sıvı gübresi	209 ^a	–	35	CSTR
Ricve	96	–	35	Batch
Havuç	71	–	35	Batch
Lahana	62	–	35	Batch
Tavuk derisi	10	–	35	Batch
Yumurta	7	–	35	Batch
Yağsız et	8	–	35	Batch
Gıda atıkları	196	160°C 2 saat	36	Batch
Gıda atıkları	60 ^a	-	35	Batch
Gıda atıkları	77	–	35	Batch
Gıda atıkları	125 ^a	–	35	CSTR
Gıda atıkları	63	pH 12,5 1 gün	35	CSTR
Gıda atıkları	65	–	40	CSTR
Gıda atıkları	13	–	20	CSTR
Gıda atıkları	3	–	37	CSTR
Gıda atıkları	16.5	–	55	CSTR
Mutfak atıkları	72	–	n.d.	Batch
Pekmez	2,5 mol H ₂ /mol sucrose	–	37	CSTR
Pekmez	2,1 molH ₂ /molhexose	–	35	CSTR
Tatlı limon kabukları	76,4 ml/g COD _r ^a	121°C pH = 7 40 dk	32	Batch
Fasulye üretim atıkları	21	n.d.	35	CSTR
Palm yağı atık	84,4 ^a	–	60	Batch



Şekil 7. Yıllara göre dünyada hidrojen üretimi (Neuman,2001)

Figure 7. Hydrogen production in the world by years

CSTR Reaktörler: Organik kimya endüstrisinde sıklıkla kullanılan, Türkçe açılımı Sürekli Karıştırmalı Tank Reaktör olan cihazlardır. Sistem içerisine sürekli besleme yapılan ve beslenen maddenin sürekli karıştırılarak her noktada reaksiyona girilmesini sağlayan tank biçiminde sistemlerdir. Akış debisi yüksek olmayan, sıvı faz reaksiyonlarda sıkça kullanılırlar. Bu reaktörlerin sıcaklık kontrolleri kolay bir şekilde yapılabilir (Denbigh, 1984).

Görüldüğü üzere birçok farklı tarımsal faaliyete ait birçok farklı organik atıktan birçok değişken parametre ile farklı hacimlerde hidrojen gazı üretimi sağlanmıştır. Tablo 1'deki veriler daha detaylı incelendiğinde; domuz sıvı gübresinin en çok hidrojen üretim potansiyeline sahip olan organik atık olduğu görülmektedir. FAO 2019, TÜİK 2019 verilerine göre Türkiye'de 1361 baş domuz bulunmaktadır (IJAR, 2020). Bu veriye göre Türkiye'de domuz yetiştiriciliğinin çok düşük seviyede olduğu görülmektedir, bu nedenle domuz sıvı gübresinin bulunması ve hidrojen üretim proseslerine sokulması zor olduğundan Türkiye için bu organik atık dikkate alınmayabilir. Tablo 1'deki diğer değerler Türkiye için dikkate alındığında gıda atıklarının (196 mL H₂gVS-1) ve mısır sapının (150 mL H₂gVS-1) en yüksek hidrojen üretim potansiyeline sahip olan organik atıklar olduğu görülmüştür. Gıda atıklarının farklı ön arıtma işlemleriyle farklı miktarlarda hidrojen üretimine olanak sağladığı yine tablo 1 incelendiğinde ortaya çıkmaktadır. Bu bilgiler ışığında 160°C sıcaklıkta 2 saat ön arıtma işlemine tabii tutulmuş gıda atıklarının en yüksek hidrojen üretim potansiyeline sahip organik atık olduğu görülmüştür. Aynı durum mısır sapı için de geçerli olup; %0,2 HCl çözeltilisinde 30 dk süresince haşlanarak ön arıtma işlemine tabii tutulmuş mısır sapı, kendi türü içerisinde en yüksek hidrojen üretim potansiyeline sahip olan organik atıktır. En düşük hidrojen üretim potansiyeline sahip organik atığın inek dışkısı ve idrarı (0,7 mL H₂gVS-1) olduğu yine Tablo 1'de belirtilmiştir.

Hidrojen, bilindiği üzere yakıt hücrelerinde yüksek verimle ve direkt olarak elektrik enerjisine dönüştürülebilmektedir ve bu önemli bir avantajdır (Ahmadi ve ark., 2013, Nie ve ark., 2008). Ancak, hidrojen gazı doğada hazır olarak bulunmadığı için termokimyasal, fotokatalitik ve elektroliz gibi temel yöntemlerle elde edilebilmektedir (Dincer ve ark., 2015, Funk ve ark., 2001, Kawai ve ark., 1980, Turner ve ark., 2004). Elektroliz yöntemi, hidrokarbonlara ihtiyaç duyulmadan sudan daha

yüksek verimde ve saflıkta hidrojen elde etmeye imkân sağlamaktadır (Ni ve ark., 200; Ni ve ark., 2006, Ball ve ark., 2009, Moriarty ve ark., 2009, Kaya ve ark., 2020). Araştırmalar sonucunda organik atık maddelerinden hidrojen elde etmek için en çok kullanılan yöntemlerin başında karanlık fermantasyon ve elektroliz gelmektedir (De Giannis ve ark., 2014, Castello ve ark., 2009). Ancak, beraberinde getirdiği çevresel atık arıtımı gibi avantajlar ve daha rahat ve düşük maliyetle çalışma imkanları sağlaması nedeniyle, elektroliz işleminin hidrojen gazı üretimi için daha uygun bir yol olduğu görülmektedir (Shin, 2007).

Bu belirlemelerde referans alınan faktörler aşağıda sıralanmıştır (Kumar ve ark., 2019, Levene ve ark., 2007, Fujiwara ve ark., 2008, Carmo ve ark., 2013, Ayers ve ark., 2010, Zeng ve ark., 2010):

- Yüksek hücre verimi,
 - Saf hidrojen gazını büyük miktarlarda üretebilmesi
 - Yüksek ve düşük sıcaklıklarda çalışabilmesi
 - Elektrik kaynağı için yenilenebilir sistemlere entegre edilebilmesi
 - Operasyon maliyetlerinin daha hesaplı olması
 - Donanım konusunda geniş bir çalışma imkanı tanınması
 - Stabil ve dengeli bir şekilde çalışması
 - Destekli ve referanslı bilgilere kolayca ulaşma imkanı
- Elektroliz işleminin avantajları yanında dezavantajları da vardır ve bu dezavantajlar aşağıda sıralanmıştır:
- İşlem sırasında basınç ve sıcaklığın birden ve çok yükselmesi
 - Kullanılan materyallerin korozyona uğrayabilmesi
 - Elektroliz sistemine uygulanacak gücün limitlere maruz kalması (Carmo ve ark., 2013, Yerokhin ve ark., 1999).

Organik atıklardan elektroliz ile hidrojen gazının elde edilmesi üzerine yapılan literatür taramalarında, elektrokimyasal indirgeme, biyorafineri, elektrolitik yenileme ve mikrobiyal elektroliz yöntemleri ile karşılaşılmıştır (Chenge ve ark., 2007, Cooper ve ark., 1997, Johnson ve ark., 2000, Lu ve ark., 2016). Bu yöntemlerin verimini etkileyen birçok kriter bulunmaktadır. Bu kriterler;

- pH
- Sıcaklık
- Basınç gibi temel etkenlere direkt olarak bağlıdır (Guo,2010).

Bu sistemlere ek olarak, organik atıklardan hidrojen ile elektrik enerjisi üretmeye yarayan mikrobiyal yakıt hücrelerine rastlanılmıştır (Lu, 2016). Bu sistemlerde, elektrokimyasal olarak aktif mikro-organizmalar kullanılarak, organik atıklardan elektrik enerjisi ve hidrojen gazı üretimi gerçekleştirilmektedir (Gil ve ark., 2003, Rabaey ve ark., 2003). Aşağıda Tablo 2'de organik atıkların başında gelen gliserol, glukoz, asetat, laktik asit bileşiklerinin elektrolizine ait kimyasal denklemler verilmiştir (Selembo,2009).

Organik atığın elektrolizi işleminde, elektrokimyasal aktif bakteriler organik atığı oksidize (Başka bir elementin oksijen tarafından yükseltgenmesi, yani elementin elektronunu oksijenin alması, elementin + yüklü, oksijenin ise - yüklü hale geçmesi) ederler ve bu sırada CO₂, elektron ve proton açığa çıkarılırlar. Bakteriler bu sırada elektronları anoda transfer ederler ve protonlar elektrolite

salınır. Dışarıdan bir güç kaynağı ile elektroliz sistemi beslendiğinde ise serbest iyonlar harekete geçer ve serbest moleküller katotta hidrojen gazı çıkışı gerçekleştirirler (Kadier ve ark., 2016, Liu ve ark., 2005). Guo ve ark., (2010) tarafından yürütülen çalışmalarda Tablo 1'de verilen organik atıklar 1 m³'lük reaktörlere girdi olarak verilmiş ve bu organik atıkların hidrojen gazı üretim potansiyellerini incelemişlerdir. Kullanılacak organik atık eğer sıvı ise, önce filtreleme işlemine tabii tutulur, bu filtreleme işlemi organik atığın katı ve kirli partiküllerinden ayrılması için yapılması gereken önemli bir uygulamadır çünkü istenmeyen maddeler elektroliz işleminin ve sisteminin verimli ve performanslı çalışması üzerinde negatif etkiler yaratmaktadır. Filtreleme işlemi sonrasında organik atık elektroliz sistemine peristaltik pompa (Model No. 7523-90, Masterflex, Vernon Hills, IL) yardımıyla 40 mL/dk debisi ile girdi olarak verilir ve daha sonra sisteme voltaj (0,9V) uygulanarak elektroliz işlemine başlanır. Multimetre (Model 2700, Keithley Instruments, Inc., OH) yardımıyla akım ve direnç (10 Ω) değerleri ölçülür. Elektroliz sisteminde performansı ve üretim hacmini etkileyen belli başlı kriterler vardır. Bu kriterler;

- Elektrot
- Elektrolit olarak sıralanabilir.

Elektroliz işleminde en çok kullanılan elektrot malzemelerinin başında Platin(Pt), Paslanmaz Çelik(SS), Alüminyum(Al), Aktif Karbon(AC), Grafit, Titanyum(Ti), Bakır(Cu), Tungsten(W) gelmektedir. Pt ve Ti aktif elementler oldukları için elektroliz işleminde performansları çok yüksektir. Ancak hemen korozyona uğrarlar ve maliyetleri çok yüksektir. Kim ve ark. (2018), aktif karbon (AC) ve nikel (Ni) maddelerinin kombinlenerek üretildiği elektrotlar geliştirerek, ucuz ve yüksek performanslı elektrotlar üretmeyi hedeflemişlerdir. Nikel tozlarının aktif karbon elektrotlara adsorpsiyon yöntemi ile eklenmesiyle elde edilen AC-Ni elektrotlar elde edilmektedir. Bu elektrotların kullanımı ile elektroliz işleminin performansının yaklaşık olarak %50 oranında yükseldiği araştırmalar tarafından ortaya konulmuştur (Kim ve ark., 2018). Aşağıda Tablo 3'te farklı elektrot metalleri, bu metallerin iletkenlik değerleri ve maliyet bilgileri verilmiştir (Kim, 2018);

Görüldüğü üzere AC-Ni elektrotlar daha fazla performansı daha düşük maliyete sağlayabilmektedir. Elektrolit ise performansı etkileyen diğer bir önemli etkidir. Elektroliz ne kadar az dirençli ve iyonik yönden zengin olursa elektroliz işlemi de o kadar akıcı gerçekleşir. Yapılan çalışmalarda; 6,5 mS/cm iletkenliğe sahip, 0,27 g sodyum asetat, 0,15 g glukoz, 0,11 g etanol, 0,07 g laktik asit içeren 100 mL'lik anolit çözeltisi ve 4,58 g Na₂HPO₄, 2,13 g NaH₂PO₄, 0,31 g NH₄Cl, 0,13 KCl içeren 68 mL'lik katot çözeltisi hazırlanmıştır (Kim ve ark., 2017).

Elektroliz işlemi boyunca sıvıdan gaz çıkışı gözlemlenmiştir ve çıkan gazların cinsi ve çıkış debisinin gözlemlenmesi veya analiz edilmesi için sisteme gaz kromatografisi (Model 8610B, SRI Instruments Inc., U.S.A.) bağlanmıştır. Çıkan gazlar ise sızdırmaz tedlar torbalara (0,1 L, Calibrated Instruments, NY) depolanmıştır. Elektroliz edilen atığın içeriğine bağlı olarak, hidrojen gazını yanında CO₂ ve CH₄ gazlarının da çıktığı araştırmalar tarafından ortaya konulmuştur. Sistemin organik atıktan hidrojen üretim miktarını/oranını

bulmak için ise; (L-H2/Lreactor/d) formülü kullanılır. Burada;

- L-H2: Üretilen hidrojen hacmini,
- Lreactor: Reaktör hacmini
- d: Reaktörün çalıştığı toplam zamanı ifade etmektedir.

Organik atığın elektroliz işlemi sonrasında çevre için daha az zararlı olup olmadığını anlamak için, organik atığın elektroliz işlemi öncesi ve sonrası pH değerleri, pH probu ile ölçülüp not alınmıştır.

Tablo 2. Organik bileşiklerin elektroliz tepkimeleri (Selembo,2009)

Table 2. Electrolysis reactions of organic compounds (Selembo,2009)

Gliserol	$C_3H_8O_3 + H_2O \rightarrow 3CO_2 + 14H^+ + 14e^-$
Glukoz	$C_6H_{12}O_6 + 6H_2O \rightarrow 6CO_2 + 24H^+ + 24e^-$
Asetat	$C_2H_4O_2 + 2H_2O \rightarrow 2CO_2 + 8H^+ + 8e^-$
Laktik Asit	$C_3H_6O_3 + 3H_2O \rightarrow 3CO_2 + 12H^+ + 12e^-$

Tablo 3. Bazı elektrot materyalleri ve maliyet bilgisi (Kim ve ark., 2018)

Table 3. Some electrode materials and cost information (Kim ve ark., 2018)

Elektrot	Fiyat (Ton)	İletkenlik
Ni	15135\$	12,9
Pt	913\$	9,4
SS	2598\$	1,11
Al	1743,50\$	36
Ti	4800\$	2,4
Cu	6613\$	59
W	16842,5\$	18,2

Sonuçlar

Bu çalışma, tarımsal endüstrilerin faaliyetlerinden kaynaklanan organik atıkların çevre ve canlı sağlığı için oluşturduğu tehlike üzerinde durmuş ve bu atıkların geri kazanılarak enerji veya enerji kaynağı üretilmesi için kullanılabilceğini geniş literatür taramaları yaparak ortaya koymayı ve bu çalışmalarını bir arada toplayarak literatüre katkı sağlamayı amaçlamıştır. Bu amaç doğrultusunda birçok teorik ve deneysel çalışmaya rastlanılmış, bununla birlikte bizzat deneysel bir çalışma yürütülerek, elektroliz işlemine tabii tutulan organik atığın, elektroliz işlemi sonrası pH değerinin yükseldiği, yani asidik seviyeden bazik seviyeye geçiş yaptığı gözlemlenmiştir. Bu şu demektir; elektroliz işlemi sonucu çevre için zararlı olan bir atık, elektroliz işlemi ile daha zararsız bir hale dönüşmüştür. Bunun yanında çok değerli ve verimli bir enerji kaynağı olan hidrojen gazı, yerli kaynaklardan ve geri kazanım ile elde edilmiştir. Organik atıkların elektroliz edildiği sistemlerin avantajları bu çalışmanın dikkate değer olduğunu ortaya koymuştur. Bu avantajlar;

- Çevre dostu ve verimli sistemlerdir
- Düşük enerji tüketimi
- Pahalı donanımlara ihtiyaç duymaması
- Organik atıklardan yüksek verimle hidrojen gazı üretebilmesi
- Elektroliz işlemine tabii tutulacak madde konusunda büyük bir yelpaze sağlaması

- Yenilenebilir enerji sistemleri ile kombine edilebilmesi şeklinde sıralanabilir (Sun ve ark., 2009; Rozendal ve ark., 2006).

Bu sistemlerin dezavantajları ise;

- Sistem içerisindeki organik maddeler ve bakteriler yüzünden bozulmalar meydana gelebilir
- İşleme tabii tutulan içeriğe bağlı olarak Karbondioksit (CO₂) ve Metan (CH₄) gibi gazlar çıkabilir
- Metan gazı çıkışına bağlı olarak sistemde sıcaklık ve basınç artabilir, bu da patlamalara sebep olabilir şeklinde sıralanabilir (Logan ve ark., 2008; Tartakovsky ve ark., 2008, Ambler ve Logan, 2011).

Genel tabloya bakıldığında, tarımsal faaliyetlerin atıklarının geri kazanılarak değerli bir enerji kaynağı elde edilmesi önu açık bir alan olmakla birlikte geliştirilmeye de oldukça açıktır. Gün geçtikçe bu konuda deneysel ve teorik çalışmalar yapılmakta ve literatüre kazandırılmaktadır.

Teşekkür

Sorumlu yazar Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Fatih Kaya, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimi, FKB-2019-9134 ve FYL-2020-10620 kodlu projelere çalışmaya desteklerinden ötürü teşekkür eder.

Kaynaklar

Ahmadi P, Dincer I, Rosen, MA. 2013. "Energy and Exergy Analyses of Hydrogen Production Via Solar-Boosted Ocean Thermal Energy Conversion and Pem Electrolysis", *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(4): 1795-1805.

Ambler JR., Logan BE. 2011. "Evaluation of Stainless Steel Cathodes and a Bicarbonate Buffer for Hydrogen Production in Microbial Electrolysis Cells Using a New Method for Measuring Gas Production", *international journal of hydrogen energy*, 36(1): 160-166.

Ayers KE, Anderson EB, Capuano C, Carter B, Dalton L, Hanlon G, Manco J, Niedzwiecki M. 2010. "Research Advances Towards Low Cost, High Efficiency Pem Electrolysis", *ECS transactions*, 33(1): 3.

Azbar N, Dokgöz FTÇ, Keskin T, Korkmaz KS, Syed HM. 2009. "Continuous Fermentative Hydrogen Production from Cheese Whey Wastewater under Thermophilic Anaerobic Conditions", *International journal of Hydrogen energy*, 34(17): 7441-7447.

Ball M, Wietschel M. 2009. "The Future of Hydrogen—Opportunities and Challenges", *International journal of hydrogen energy*, 34(2): 615-627.

BEPA Türkiye Biyokütle Enerjisi Potansiyeli Atlası. 2020. <https://bepa.enerji.gov.tr/>

Carmo M, Fritz DL, Mergel J, Stolten D. 2013. "A Comprehensive Review on Pem Water Electrolysis", *International journal of hydrogen energy*, 38(12), 4901-4934.

Carvalho F, Prazeres AR, Rivas J. 2013. "Cheese Whey Wastewater: Characterization and Treatment", *Science of the total environment*, 445: 385-396.

Castelló E, Santos CG, Iglesias T, Paolino G, Wenzel J, Borzacconi L, Etcheberere C. 2009. "Feasibility of Biohydrogen Production from Cheese Whey Using a Uasb Reactor: Links between Microbial Community and Reactor Performance", *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(14): 5674-5682.

Cheng S, Logan BE. 2007. "Ammonia Treatment of Carbon Cloth Anodes to Enhance Power Generation of Microbial Fuel Cells", *Electrochemistry Communications*, 9(3): 492-496.

Cooper JF, Wang J, Krueger R, King K. 1997. *Destruction of Organic Wastes by Ammonium Peroxydisulfate with Electrolytic Regeneration of the Oxidant*. Lawrence Livermore National Lab., CA (United States).

De Gioannis G, Friargiu M, Massi E, Muntoni A, Poletti A, Pomi R, Spiga D. 2014. "Biohydrogen Production from Dark Fermentation of Cheese Whey: Influence of Ph", *International journal of hydrogen energy*, 39(36): 20930-20941.

Denbigh KG, 1984. *Chemical Reactor Theory*, Cambridge University Press, USA

Diamantis V, Aivasidis A. 2018. "Performance of an Ecsb Reactor for High-Rate Anaerobic Treatment of Cheese Industry Wastewater: Effect of Pre-Acidification on Process Efficiency and Calcium Precipitation", *Water Science and Technology*, 78(9): 1893-1900

Dincer I, Acar C, 2015. Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *International journal of hydrogen energy*, 40: (34): 11094-11111

Ergüder T, Tezel U, Güven E, Demirel G. 2001. "Anaerobic Biotransformation and Methane Generation Potential of Cheese Whey in Batch and Uasb Reactors", *Waste management*, 21(7): 643-650.

FAO. <http://www.fao.org/faostat/en/#data> (Son erişim: 2020).

Friel S, Dangour AD, Garnett T, Lock K, Chalabi Z, Roberts I, Butler A, Butler CD, Waage J, McMichael AJ. 2009. "Public Health Benefits of Strategies to Reduce Greenhouse-Gas Emissions: Food and Agriculture", *The Lancet*, 374(9706): 2016-2025.

Frigon JC, Breton J, Bruneau T, Moletta R, Guiot S. 2009. "The Treatment of Cheese Whey Wastewater by Sequential Anaerobic and Aerobic Steps in a Single Digester at Pilot Scale", *Bioresource technology*, 100(18): 4156-4163.

Fujiwara S, Kasai S, Yamauchi H, Yamada K, Makino S, Matsunaga K, Yoshino M, Kameda, T, Ogawa T, Momma S. 2008. "Hydrogen Production by High Temperature Electrolysis with Nuclear Reactor", *Progress in Nuclear Energy*, 50(2-6): 422-426.

Funk JE. 2001. "Thermochemical Hydrogen Production: Past and Present", *International Journal of Hydrogen Energy*, 26(3), 185-190.

Genç N. 2011 "Atıkların Biyohidrojen Üretim Potansiyellerinin Değerlendirilmesi." Pamukkale University Journal of Engineering Sciences 17.2.

Gil GC, Chang IS, Kim BH, Kim M, Jang JK, Park, HS, Kim HJ. 2003. "Operational Parameters Affecting the Performance of a Mediator-Less Microbial Fuel Cell", *Biosensors and Bioelectronics*, 18(4): 327-334.

Grigoriev S, Poremsky V, Fateev V. 2006. "Pure Hydrogen Production by Pem Electrolysis for Hydrogen Energy", *International Journal of Hydrogen Energy*, 31(2): 171-175.

Guo XM, Trabl, E, Latrille E, Carrere H, Steyer JP. 2010. Hydrogen production from agricultural waste by dark fermentation: a review. *International journal of hydrogen energy*, 35(19): 10660-10673

Hu H, Fan Y, Liu H. 2008. "Hydrogen Production Using Single-Chamber Membrane-Free Microbial Electrolysis Cells", *Water research*, 42(15): 4172-4178.

Jardan RK, Nagy I, Varga Z, Special Features of Ultrahigh-Speed Induction Generators Applied in the Utilization of Renewable Energy Sources, 2008 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. 1439-1444, 2008.

Johnson D, Feng J, Houk L. 2000. "Direct Electrochemical Degradation of Organic Wastes in Aqueous Media", *Electrochimica Acta*, 46(2-3): 323-330.

- Kadier A, Simayi Y, Abdeshahian P, Azman NF, Chandrasekhar K, Kalil MS. 2016. "A Comprehensive Review of Microbial Electrolysis Cells (Mec) Reactor Designs and Configurations for Sustainable Hydrogen Gas Production", Alexandria Engineering Journal, 55(1): 427-443.
- Kaldellis J, Zafirakis D. 2007. "Optimum Energy Storage Techniques for the Improvement of Renewable Energy Sources-Based Electricity Generation Economic Efficiency", Energy, 32(12): 2295-2305.
- Karakış E. 2019. Enerji Arz Güvenliği, Piyasalar ve İstatistik Dairesi Başkanlığı, Ağustos 2019 Aylık Enerji İstatistikleri Raporu.
- Kawai T, Sakata T. 1980. "Photocatalytic Hydrogen Production from Liquid Methanol and Water", Journal of the Chemical Society, Chemical Communications, (15): 694-695.
- Kaya MF. 2017. "Investigation of alkaline water electrolysis performance for different cost effective electrodes under magnetic field." International Journal of Hydrogen Energy 42.28: 17583-17592.
- Kaya MF. 2020. "Improving PEM water electrolyser's performance by magnetic field application." Applied Energy 264: 114721.
- Kim KY, Wulin Y, Bruce EL. 2018. Science & Technology 52.12: 7131-7137.
- Kim KY, Zikmund E, Logan BE. Impact of catholyte recirculation on different 3-dimensional stainless steel cathodes in microbial electrolysis cells. Int. J. Hydrogen Energy 42(50): 29708-29715.
- Kumar SS, Himabindu, V. 2019. "Hydrogen Production by Pem Water Electrolysis—a Review", Materials Science for Energy Technologies.
- Levene JI, Mann MK, Margolis RM, Milbrandt A. 2007. "An Analysis of Hydrogen Production from Renewable Electricity Sources", Solar Energy, 81(6): 773-780.
- Liu H, Grot S, Logan BE. 2005. "Electrochemically Assisted Microbial Production of Hydrogen from Acetate", Environmental science & technology, 39(11): 4317-4320.
- Logan BE, Call D, Cheng S, Hamelers HV, Sleutels TH, Jeremiasse AW, Rozendal RA. 2008. "Microbial Electrolysis Cells for High Yield Hydrogen Gas Production from Organic Matter", Environmental science & technology, 42(23): 8630-8640.
- Lu L, Ren ZJ. 2016. "Microbial Electrolysis Cells for Waste Biorefinery: A State of the Art Review", Bioresource technology, 215: 254-264.
- Mazloomi K, Gomes C. 2012. "Hydrogen as an Energy Carrier: Prospects and Challenges", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(5): 3024-3033.
- Moriarty P, Honnery D. 2009. "Hydrogen's Role in an Uncertain Energy Future", international journal of hydrogen energy, 34(1): 31-39.
- Neuman EB, 2001. Chemical Reactor Design, Optimization, and Scaleup, New York.
- Ni M, Leung MK, Sumathy K, Leung DY. 2006. "Potential of Renewable Hydrogen Production for Energy Supply in Hong Kong", International Journal of Hydrogen Energy, 31(10): 1401-1412.
- Ni M, Leung MK., Leung DY, Sumathy K. 2007. "A Review and Recent Developments in Photocatalytic Water- Splitting Using Tio2 for Hydrogen Production", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11(3): 401-425.
- Nie J, Chen Y, Boehm RF, Katukota S. 2008. "A Photoelectrochemical Model of Proton Exchange Water Electrolysis for Hydrogen Production", Journal of Heat Transfer, 130(4): 042409.
- Rabaey K, Lissens G, Siciliano SD, Verstraete W. 2003. "A Microbial Fuel Cell Capable of Converting Glucose to Electricity at High Rate and Efficiency", Biotechnology letters, 25(18): 1531-1535.
- Rozendal RA, Hamelers HV, Euserink GJ, Metz SJ, Buisman CJ. 2006. "Principle and Perspectives of Hydrogen Production through Biocatalyzed Electrolysis", International journal of hydrogen energy, 31(12): 1632-1640.
- Rozendal RA, Hamelers HV, Molenkamp RJ, Buisman CJ. 2007. "Performance of Single Chamber Biocatalyzed Electrolysis with Different Types of Ion Exchange Membranes", Water research, 41(9): 1984-1994.
- Şahin, G. 2020. Türk Dünyasında Domuz (Sus Scrofa Domesticus) Yetiştiriciliği ve Türk Kültüründe Domuz,Uluslararası Afro-Avrasya Araştırmaları Dergisi / Cilt: 5 Sayı: 9 /Ocak 2020 International Journal of Afro-Eurasian Research (IJAR) / Volume: 5 Issue: 9 /January 2020 e-ISSN 2602-215X
- Selembo PA, Perez JM, Lloyd WA, Logan BE. 2009. "High Hydrogen Production from Glycerol or Glucose by Electrohydrogenesis Using Microbial Electrolysis Cells", International journal of hydrogen energy, 34(13): 5373-5381.
- Shin Y, Park W, Chang J, Park J. 2007. "Evaluation of the High Temperature Electrolysis of Steam to Produce Hydrogen", International Journal of Hydrogen Energy, 32(10-11): 1486-1491.
- Singh M, Khadkikar V, Chandra A, Varma RK. 2010. "Grid Interconnection of Renewable Energy Sources at the Distribution Level with Power-Quality Improvement Features", IEEE transactions on power delivery, 26(1): 307-315.
- Sun M, Sheng GP, Mu ZX, Liu XW, Chen YZ, Wang HL, Yu HQ. 2009. "Manipulating the Hydrogen Production from Acetate in a Microbial Electrolysis Cell– Microbial Fuel Cell-Coupled System", Journal of Power Sources, 191(2): 338-343.
- Tartakovskiy B, Manuel MF, Neburchilov V, Wang H, Guiot S. 2008. "Biocatalyzed Hydrogen Production in a Continuous Flow Microbial Fuel Cell with a Gas Phase Cathode", Journal of Power Sources, 182(1): 291-297.
- TÜİK, 2018. Türkiye sektörler bazında sera gazı emisyonu, <http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=33675>
- Turner JA. 2004. "Sustainable Hydrogen Production", Science, 305(5686), 972-974. <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=92&locale=tr>, (Erişim: 2020).
- Veziroğlu TN, Şahin S. 2008. "21st Century's Energy: Hydrogen Energy System", Energy conversion and management, 49(7): 1820-1831.
- Xin Mei Guo ET, He'le'ne Carre're EL, Steyer JP. 2010 "Hydrogen Production from Agricultural Waste by DarkFermentation: A Review", International Journal of Hydrogen Energy 35(19): 10660-10673.
- YEGM, 2020. Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, Biyoetanol.<http://www.yegm.gov.tr/yenilenebilir/biyoetanol.aspx>
- Yerokhin A, Nie X, Leyland A, Matthews A, Dowey S. 1999. "Plasma Electrolysis for Surface Engineering", Surface and coatings technology, 122(2-3): 73-93.
- Zeng K, Zhang D. 2010. "Recent Progress in Alkaline Water Electrolysis for Hydrogen Production and Applications", Progress in Energy and Combustion Science, 36(3): 307-326.