

FİZİKSEL PARAMETRELERİN HİDROJEN PEM YAKIT HÜCRESİ PERFORMANSINA ETKİLERİ ÜZERİNE DEĞERLENDİRME

*Selman İLBEYOĞLU** 

*Hüseyin GÜRBÜZ*** 

Alınma: 04.05.2023 ; düzeltme: 01.11.2023 ; kabul: 02.01.2024

Öz: Geleneksel fosil yakıtlar, rezervlerinin sınırlı ve ciddi zararlı kirletici sorunlarının olması önemli problemdir. Fosil yakıtlara en önemli sürdürülebilir alternatif yakıt ve enerji kaynağı hidrojenidir. Hidrojenin kimyasal enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürüldüğü sistem olan direkt hidrojenli PEM yakıt hücresi umut vaat eden bir enerji kaynağıdır. Bu çalışmada PEM yakıt hücresinin bileşenlerinin ve bazı durumların PEM yakıt hücresi performansına etkisi irdelenmiştir. Öncelikle PEM yakıt hücresinin çalışma sistemi irdelendi. Yakıt hücresinin parçaları ve bu parçaların yakıt hücresi yığın maliyetine etkisi incelendi. Son olarak membran, gaz difüzyon tabakası, bipolar tabaka ve anot-katot elektrotlarının PEM yakıt hücresi performansına etkileri araştırıldı. PEM yakıt hücresinde membran kalınlığı azaldıkça performansın arttığı görüldü. Gaz difüzyon tabakasında az veya aşırı suyun, yakıt hücresi performansı sınırlayıcı etkisi tespit edildi. Grafit gibi elektrik iletkenliği iyi olan ve korozyona dayanıklı bipolar plakanın yakıt hücresi performansını artırdığı tespit edildi. Elektrotların elektrik iletkenliği ve hidrojenin elektrotların yüzeyine tutunma kabiliyeti artıkça performansı olumlu etkilediği görüldü.

Anahtar Kelimeler: PEM Yakıt pili, Yakıt pili performansı, Membran, Elektrot, Bipolar plakalar

Evaluation of the Effects of Physical Parameters on the Performance of Hydrogen PEM Fuel Cells

Abstract: Fossil fuels have limited reserves and cause harmful pollution. Hydrogen is the most promising sustainable alternative fuel and energy source. Direct hydrogen PEM fuel cells, which convert chemical energy to electrical energy, offer potential as an energy source. This study examined the components and conditions that affect the performance of PEM fuel cells. The effects of the membrane, gas diffusion layer, bipolar plate, and anode-cathode electrodes were investigated. It was found that decreasing the membrane thickness increased performance. The impact of excessive or insufficient water in the gas diffusion layer was found to limit performance. The use of bipolar plates with good electrical conductivity and corrosion resistance, such as graphite, improved performance. Increasing the electrical conductivity of the electrodes and their ability to adhere to hydrogen on their surface positively affected performance.

Keywords: PEM Fuel Cell, Fuel cell performance, Membrane, Electrode, Bipolar plates

*Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Enerji Bilimi ve Teknolojileri Bölümü, Şırnak Üniversitesi 73000, Şırnak, Türkiye

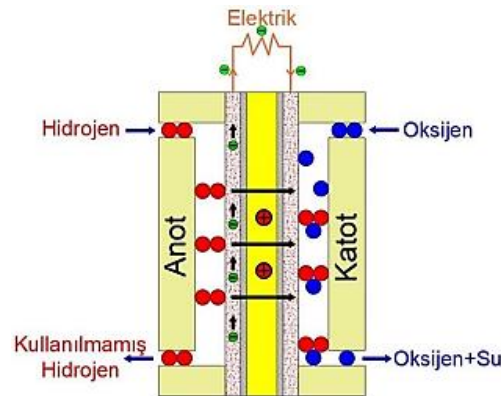
**Makine Mühendisliği Bölümü, Otomotiv Programı, Şırnak Üniversitesi, 73000, Şırnak, Türkiye

İletişim Yazarı: Selman İLBEYOĞLU(selman.dayanfb@gmail.com)

1. GİRİŞ

Enerjinin tüketimi gün geçtikçe artmasına rağmen ana enerji kaynağı olan fosil yakıtlar giderek azalmaktadır. Fosil yakıtların giderek sürdürülebilirliği ve rezervi tükenmekte olup ömürlerinin kısa olduğu bilinmekte (Wang et al., 2016). Fosil yakıt rezervleri 2009 yılında yapılan bir tahmine göre kömür yaklaşık 107 yıl, ham petrol yaklaşık 35 yıl, doğal gaz yaklaşık 37 yıl dayanabilirken (Shafiee & Topal, 2009) dünya nüfusu ve dolayısıyla enerji talebi artmaya devam etmektedir. Eğer fosil yakıtlar önlem alınmadan kullanılmaya devam edilirse, gelecekte enerji kaynakları ve çevre konusunda daha büyük sorunlarla karşılaşabiliriz (Aydın, 2007).

Bu sorunlarla karşılaşıldığında, mevcut fosil yakıt kullanım tesislerinin optimizasyonu ya da yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesi umut verici oluyor (Wang et al., 2016). Priya ve ark. (Rizwan et al., 2018) araştırmalarında yenilenebilir enerji kaynakları çevre dostu oldukları için fosil ürünlere tek alternatif olmaya devam ettiğini belirtmişlerdir (Islam et al., 2015). Dünya genelinde üretilen enerjinin yalnızca %0,02'si insanlar tarafından yönetilmektedir. Bu değer, yenilenebilir enerjilerin enerji arzının yaklaşık %25'ini oluşturduğu bir pazar payına sahiptir (Sorensen, 2017). Avrupa birliği ülkelerinde elektrik üretiminde kullanılan güneş ve rüzgar enerji kaynaklarını kombine olarak kullanımını 2050 yılına kadar %70'e çıkarmayı hedeflemektedir (Tzelepis et al., 2021). Günümüzde, fosil yakıtların yerine kullanılacak yenilenebilir enerji kaynakları arasında güneş, rüzgar, jeotermal, hidroelektrik ve nükleer enerji kaynakları bulunmaktadır. Ancak bu kaynakların hiçbiri fosil yakıtların en çok kullanılan alan olan taşıtlarda kullanılmaya uygun değildir (Scherer, 2004). Dolayısıyla alternatif enerji kaynaklarından temiz, güvenli, ekonomik düzeyde enerji arzını karşılayabilmek için bir yol keşfetmeye çalışmakla beraber hidrojen, çeşitli temiz enerji kaynaklarından üretilmesi ve yakıt pillerinde elektrik üretimi gibi farklı uygulamalarda kullanılabilmesi nedeniyle enerji geçişinde kilit rol oynamaktadır (Şenpınar & Gençoğlu, 2006). Özellikle proton elektrolit membran (PEM) yakıt pillerinde büyük gelişmeler kaydedilmiştir. PEM yakıt hücreleri (PEMFC), elektrokimyasal reaksiyonun meydana geldiği platform olarak membran elektrot tertibatını (membrane electrode assembly, MEA) kullanarak elektrik üretmek için hidrojen ve oksijen arasındaki reaksiyonu kullanan enerji dönüştürme cihazlarıdır (Awotwe et al., 2015). Bir PEM yakıt hücresinin çalışma prensibi Şekil 1'de gösterildiği gibi, gaz yakıtları anot tarafından, oksitleyici gazlar ise katot tarafından aktarılır. Anot bölgesinde yükseltme reaksiyonları, katot bölgesinde ise indirgeme reaksiyonları gerçekleşir. Elektrotlar arasındaki elektrolit içinde ise, anottan katoda doğru bir iyon geçişi gerçekleşir (Karaoğlu & Kuralay, 2014).



Şekil 1:

Yakıt pili temel çalışma prensibi (GELİŞ, 2020.)

Anot tarafında: (Hidrojen yükseltgenme reaksiyonu)



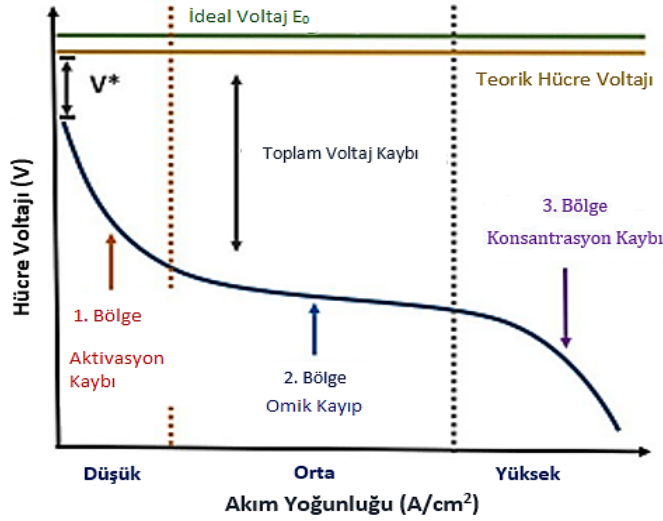
Katot tarafında: (Oksijenin indirgenme reaksiyonu)



Tüm reaksiyon:



Yakıt hücresinde anot ve katot tarafında gerçekleşen reaksiyonlar denklem 1, 2, 3'te gösterilmiştir (Mench, 2008). Elektrokimyasal reaksiyonun yan ürünleri su ve ısıdır. Yakıt pilleri genel olarak oldukça verimli enerji üretim araçlarıdır. PEM yakıt hücreleri hızlı başlama süresine sahiptir ve çok sağlamdır. Yapılarında hareketli parça bulunmadığından daha az bakım gerektirirler (Krope et al., 2017). PEM yakıt hücresinin performansı, voltaj-akım polarizasyon eğrisi kullanılarak ölçülür. Bu eğri, belirli bir akım yoğunluğu yüklemesi altında yakıt hücresinin voltaj çıkışını gösterir. Şekil 2'de, yakıt hücresinin polarizasyon eğrisi görülebilir. Anot ve katot aktivasyon kayıpları eşit olarak değerlendirilse de, kayıpların çoğu katotta oksijen indirgenme reaksiyonlarının yavaş olması nedeniyle meydana gelir (Gürbüz, 2021). Ayrıca uygulamada açık devre potansiyeli olarak adlandırılan hücre potansiyeli, teorik potansiyel değerinden düşük olup genellikle 1Volt'tan daha azdır. Bu durum dış bir akım olmadığında bile hücre içerisinde bir takım kayıplar olduğunu göstermektedir. Başlıca kayıplar; aktivasyon kayıpları, ohmik (direnç) kayıpları ve konsantrasyon (kütle transferi) olmak üzere 3 grupta ifade edilebilir(Meral, P. (2019).



Şekil 2:

PEM yakıt hücresinin polarizasyon eğrisi (Blanco-Cocom et al., 2022)

1.1. Aktivasyon Kayıpları

Elektrot üzerinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlarda, iyonların oluşma şekli ve oluşma hızları ile ilgili bir büyüklük vardır. Elektronların alınması veya verilmesi, gaz ile katalizör yüzeyindeki atomların etkileştiği durumdur. İyonların oluşması için gaz içindeki bağların kırılması ve yeni bağların oluşturulması gereklidir, bu nedenle reaksiyonların başlaması için aktivasyon enerjisi harcanmalıdır. Bu süreçler için gereken enerjiler ve elektron / proton kayıpları, aktivasyon kayıplarını meydana getirir. Aktivasyon kayıpları denklem 4'te ifade edilen yarı deneysel Tafel denklemi ile belirtilir:

$$\eta_{\text{akt}} = \frac{R.T}{a.n.F} \ln \frac{i}{i_0} \quad (4)$$

Denlem 4'te a = Elektron Transfer Katsayısı, i_0 =Dönüşüm Akım Yoğunluğu, R =Genel Gaz Sabiti, F = Faraday Sabiti, T =Sıcaklık, n =Molekülde Bulunan Elektronların Sayısı olarak tanımlanır. a , elektrotta kullanılan malzemeye bağlı olarak 0-1 aralığında değer alır. Reaksiyonlar, katottakine göre anotta daha yavaş ilerlediği için katotta aktivasyon kayıpları daha fazla olur. Düşük sıcaklıklarda çalışan yakıt pillerinde aktivasyon kayıpları yüksektir. Aktivasyon kayıpları, gaz-elektrot-elektrolit arayüzeyinin hassas bir şekilde ayarlanması ile azaltılabilir. Ayrıca daha gelişmiş katalizörlerin kullanılması, elektrot yüzeyinin pürüzlülüğünün artırılması, reaktantların konsantrasyonunun artırılması, sıcaklık ve basınç artışı, aktivasyon kayıplarını azaltabilir. (Barbir, F. 2005).

1.2. Ohmik Kayıpları

Elektrolitteki iyonların akışına karşı olan direnç ve elektrot malzemelerindeki elektron akışına karşı dirençler, direnç kayıplarını oluşturur. Yakıt hücresi voltaj-akım karakteristiğinde, aktivasyon kayıplarından sonra, konsantrasyon kayıpları belirgin hale gelene kadar lineer olarak devam eder. Aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$\eta_{\text{ohm}} = i.R_i \quad (5)$$

Denklem 5'teki i = Yakıt hücresinin akım yoğunluğu, R_i = Hücre İçi Toplam Dirençtir. Toplam iç direnç; iyonik, elektronik ve temas direncinden oluşur. Elektrolitteki kayıplar daha fazladır. Bu kayıplar elektrolitin iyon iletkenliğini artırarak ve elektrotlar arasındaki mesafeyi kısaltarak azaltılabilir.

1.3. Konsantrasyon Kayıpları

Yakıt hücresinde akım başladıktan sonra, çevreleyen materyalin akışkanın ilk konsantrasyon değerini koruyamaması nedeniyle bir potansiyel kaybı meydana gelir. Ayrıca, gazların elektrot gözeneklerinde yavaş yayılması, tepkilerin/ürünlerin erimesi veya bozunması, tepkilerin/ürünlerin elektrolit üzerinden elektrokimyasal reaksiyon bölgesinin içine veya dışına kaçması, konsantrasyon kayıplarını artırır. Konsantrasyon kayıpları aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$\eta_{\text{kons}} = \frac{R.T}{n.F} \ln\left(1 - \frac{i}{i_0}\right) \quad (6)$$

Denklem 6'daki i_0 = Dönüşüm Akım Yoğunluğu, R = Genel Gaz Sabiti, F = Faraday Sabiti, T = Sıcaklık, n = Molekülde bulunan elektronların sayısı olarak ifade edilir. Konsantrasyon kayıpları, saf hidrojen ve oksijen kullanımı, elektrolitin karıştırılması veya sıcaklığın artırılması yoluyla iyonik difüzyonun artırılmasıyla azaltılabilir. Ayrıca, yakıt hücresi çalışırken hidrojenin bir kısmının anottan ayrılıp membran üzerinden katot tarafına geçerek doğrudan oksijenle reaksiyona girmesi durumunda su üretilir, ancak akım çıkışı olmaz. Bu nedenle aynı miktarda hidrojen ile daha az güç üretilir.(Ayдын, M. 2007).

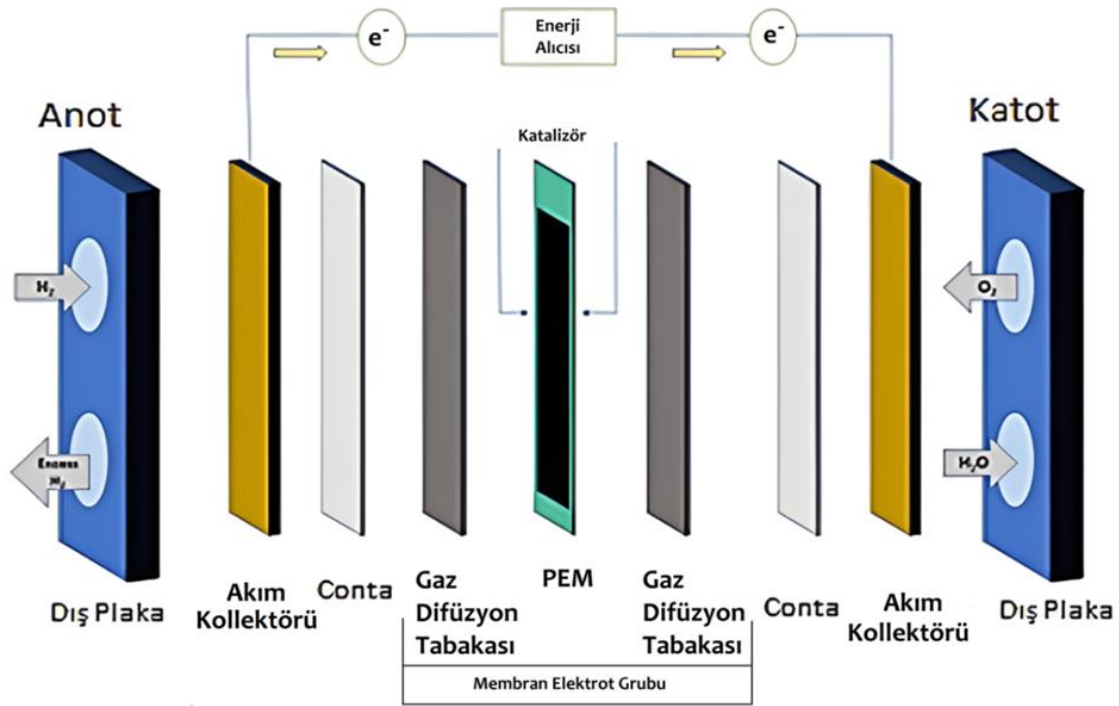
Yakıt hücresi kayıpları nedeniyle oluşan voltaj kayıpları, termodinamiksel olarak tahmin edilen voltaj değerinden çıkarılarak yakıt hücresi için gerçek voltaj çıkışı yazılabilir.

$$V = E_{\text{termo}} - \eta_{\text{akt}} - \eta_{\text{ohm}} - \eta_{\text{kons}} \quad (7)$$

Eşitlik 7'de, V yakıt hücresinin gerçek çıkış voltaj değeri, E_{termo} termodinamiksel olarak tahmin edilen çıkış voltajı, η_{ohm} , ohmik kayıptan kaynaklanan voltaj kaybı, η_{akt} , aktivasyon kaybindan kaynaklanan voltaj kaybı, η_{kons} , konsantrasyon kaybindan kaynaklanan voltaj kaybıdır(Özveren, U. 2006).

PEM yakıt hücresinde katoda saf oksijen veya hava iletilir ve hidrojen, indirgeme ve oksidasyon reaksiyonlarının meydana geldiği katalizör katmanlarına ulaşmak için anot akış kanalına yönlendirilir. Hidrojen indirgenme reaksiyonu, anot tarafında hidrojen membranla karşılaştıktan sonra H^+ iyonlarına ve serbest elektronlara bölünür. H^+ iyonları, iyonik hareketi teşvik eden elektrolit boyunca ilerler. Bu iyonlar, PEM membranı boyunca doğrudan oksijenle karşılaştıkları katot tarafına taşınır. Dış devre boyunca elektron akışı bir döngüyü kapatır. Böylece su, ısı ve elektrik enerjisi tüm bu işlemler sonunda ürün olarak elde edilir(Blanco-Cocom et al., 2022)..

PEM yakıt hücresi Şekil 3'te gösterildiği gibi genel olarak proton membran, anot ve katot elektrotlar, katalizör, bipolar plaka(BPP) ve son dış plakalardan oluşur (Kahraman & Orhan, 2017).

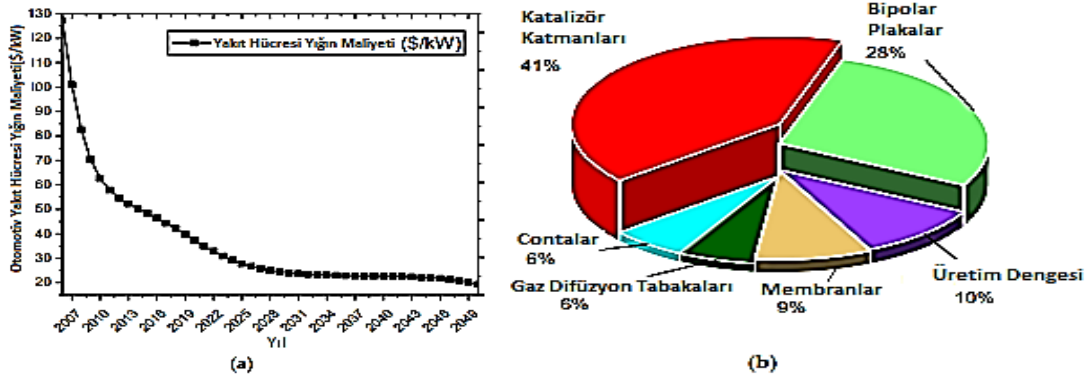


Şekil 3:

Bir yakıt hücresi elemanlarının detaylı görünümü (Parekh, 2022).

PEM yakıt hücresinde, elektrolit olarak seçici geçirgen özellikte proton iletken bir membran kullanılır. Bu nedenle, PEM yakıt hücresi ayrıca proton değişim membranlı yakıt hücresi olarak da bilinir (Mench, 2008). PEM yakıt pilleri, düşük çalışma sıcaklıkları, yüksek güç yoğunlukları ve yüksek enerji dönüşüm verimleri sayesinde otomobiller ve sabit uygulamalar için potansiyel bir güç kaynağı olarak büyük ilgi görmektedir (Costamagna & Srinivasan, 2001). PEM yakıt hücrelerinin birkaç benzersiz avantajı vardır. Bunlardan bazıları yüksek güç yoğunlukları, emisyonları ihmal edilebilirliği, sessiz çalışmaları ve hatta modüler olarak konumlandırılabilirliği en büyük farkı ortaya koyar (Pourrahmani, 2022).

Fakat, yüksek sistem maliyeti, PEM yakıt hücrelerinin ticarileştirilmesinin önündeki ana engellerden biridir (Müller et al., 2022). PEM yakıt pili elektrot yapısındaki platin (Pt) katalizörün maliyetini artırdığı için, literatürde Pt içeren alaşımların yanı sıra (PtNi, PtFe, PtCu vb.), soy olmayan metaller (Fe, Co, Mn, Ni, Cu, Cr vb.) kullanarak alternatif katalizörlerin reaksiyon mekanizmaları, performansları ve dayanıklılıkları incelenmektedir. Bu alternatif katalizörler, Pt'den farklı katalitik mekanizmalar ve reaksiyon yolları izlerler ve düşük seçicilikleri nedeniyle hız belirleyici tepkime basamağında peroksit ara ürünleri oluşturma eğilimindedirler. Ancak, bu katalizörler yakıt pili dayanıklılığını azaltacak kadar kolay korozyona uğramaktadır (Lori & Elbaz, 2020). Ek olarak, membran-elektrot montajının, sistem entegrasyonunun ve yığının ve bileşenlerinin montajının maliyetinin de önemli ölçüde azaltılması gerekir (Whiston et al., 2019). Şekil 4(a) da 2006'dan 2050'ye kadar olan genel otomotiv yakıt hücresi yığını maliyeti, 2022'den 2050'ye kadar olan projeksiyonlarla, Şekil 4(b) de ise yakıt hücresinin bileşenlerinin toplam maliyet içindeki payı gösterilmiş ve bipolar plakalar için %28'lik bir oranı kapsadığını görmekteyiz. PEM yakıt hücreleri sistemlerinde yaygın bir terim olan ve bir PEM yakıt hücresinin tüm yardımcı bileşenlerini ifade eden Üretim Dengesi, bir PEM yakıt hücresi yığınının toplam maliyetinin %10'unu da belirler.



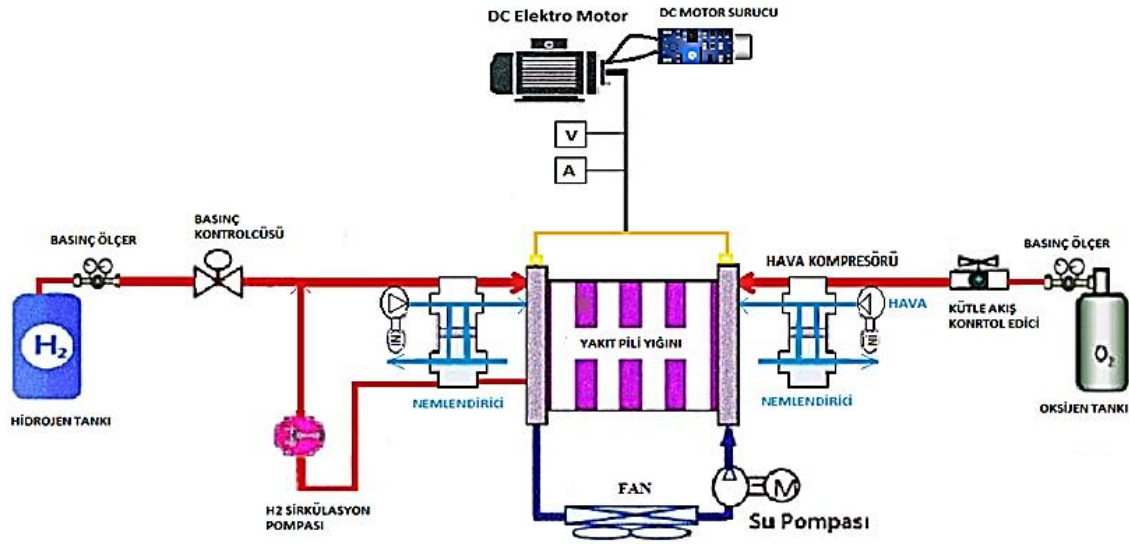
Şekil 4:

Yakıt hücresi yığınının farklı bileşenlerinin toplam maliyet içindeki payı **a.** 2006'dan 2050'ye kadar olan genel otomotiv yakıt hücresi yığını maliyeti, 2022'den 2050'ye kadar olan projeksiyonlarla, **b.** Yakıt hücresinin bileşenlerinin toplam maliyet içindeki payı (Pollet et al., 2019).

Ayrıca, mevcut PEMFC teknolojisi düşük yığın gücü yoğunluğundan muzdariptir. Hücre seviyesi, katot aktivasyonunda, oksijen taşınmasının yüksek direncinde ve elektriksel elektrot/elektrolit temasında önemli kayıplarla karşı karşıyadır (Whiston et al., 2019). Yığın seviyesi, soğutma sisteminden ve yeni BPP'lerin üretiminden daha da etkilenir; Bu nedenle, daha ince ve daha verimli BPP'ler üretmek için çalışmalar da devam etmektedir (R. Zhang et al., 2021). PEM yakıt hücrelerinin yaygın olarak ticarileşmesi henüz tam anlamıyla gerçekleşmemiştir (Ali et al., 2023). En büyük iki engel dayanıklılık ve maliyettir (Gittleman et al., 2010). MEA (S. Zhang et al., 2009), bir PEM yakıt hücresinin temel bileşenlerinden biridir. Uzun süreli işlemler sırasında, MEA bileşenleri çeşitli faktörlerden dolayı bozulmaya maruz kalabilir. Yakıt hücresi çalışmasını yöneten kütle/ısı transferi, elektrokimyasal reaksiyonlar ve iyonik/elektronik taşıma dahil üzere yakıt hücresi çalışması sırasında birbiriyle çeşitli ilişkili ve karmaşık olaylar meydana gelir (Gittleman et al., 2010).

2. PERFORMANSI ETKİLEYEN ETKENLER

PEM yakıt pillerinde gerçekleşen dinamik süreçlerin anlaşılır hale gelmesi, yakıt hücresinin performansının geliştirilmesi ve verimliliğinin artırılması için önemlidir. Bu süreçler arasında elektrot reaksiyonları, proton değişimi, yakıt ve hava beslemesi, su yönetimi ve ısı transferi gibi faktörler yer alır. Bu süreçlerin daha iyi anlaşılması, yakıt pillerinin tasarımının ve işletme koşullarının optimize edilmesine yardımcı olabilir. Bu nedenle, PEM yakıt hücreleri üzerine yapılan araştırmaların bu süreçlerin anlaşılması ve daha yüksek performans elde etmek için kritik olduğunu fark ettik. Bu bağlamda, PEM yakıt hücresini uygulamalı performans analizlerini gerçekleştirmek için literatürü titizlikle inceleyerek ve en uygun düzenlemeyi belirleyerek, Şekil 5'te gösterildiği gibi literatürden ilham alarak detaylı bir set-up oluşturduk (İÇİNGÜR, Y., & KİREÇ, L. 2011).



Şekil 5:

PEM Yakıt Hücresi uygulama deney düzeneği

Rahimi ve ark. akış kanallarının görülebildiği bir yakıt pili tasarlamışlar ve transparan yakıt pilinin tasarımı, üretimi, montajı ve test aşamalarını içeren bir çalışma sunmuşlardır (Rahimi-Esbo et al., 2017). Kahveci ve Taymaz, oksijen akış hızı, hidrojen akış hızı, nemlendirme sıcaklığı ve pil sıcaklığının kontrol altında tutularak su ve ısı yönetiminin sağlanabileceğini ifade etmişlerdir (Kahveci & Taymaz, 2014). Manso ve ark. PEM tipi yakıt pillerinin performansının, çalışma koşullarının, elektrokimyasal reaksiyonların kinetiği, hücre içi taşınım olayları ve aynı zamanda bileşenlerin özellikleri gibi birçok etkene bağlı olduğunu üzerinde durmuşlardır (Manso et al., 2012). PEM yakıt pillerinde, reaktant gazların dağılımı, akım yoğunluğu dağılımı, sıcaklık dağılımı ve su konsantrasyonunun önemli olduğunu belirtmişlerdir (Rahimi-Esbo et al., 2016), bu parametrelerin düzensiz olması durumunda MEA'nın ömrünün kısılacığına dikkat çekmişlerdir (Alizadeh et al., 2017). Lee ve ekibi, düşük sıcaklıkta çalışan PEM yakıt pillerinde yoğunlaşmış su sorununa çözüm olarak, gaz difüzyon tabakasından ve katalizör tabakasından uzaklaştırmakta zorlanılan şeffaf bir tasarıma sahip yakıt pili geliştirdiler ve bu pil üzerinde çeşitli denemeler gerçekleştirdiler (Lee et al., 2015).

3. PROTON ELEKTROLİT MEMBRAN

PEM (Proton Exchange Membrane) yakıt pilleri, diğer yakıt pili sistemlerine göre daha az karmaşık bir yapıya sahip olmaları yanı sıra diğer avantajları da vardır. Çalışma sıcaklık aralığı genel olarak 60-80 °C aralığındadır. Düşük sıcaklık ve yüksek enerji yoğunluğu sayesinde otomotiv uygulamalarında sıkça karşılaşılmaktadır. Alkali yakıt hücrelerine nazaran CO₂ toleransı bulunmamaktadır. Bu da atmosferden aldığı havayı direkt olarak kullanabilme imkânı sağlamaktadır. Bu özellikleri ile 50 W'tan 120 kW'lara kadar geniş bir aralıkta enerji sağlayabilmektedirler. (Öztürk, Y. E. 2023). Ayrıca yüksek gerilim, akım ve güç yoğunluğuna sahip olmaları, kompakt ve sağlam bir yapıya sahip olmaları ve basit bir mekanik tasarıma sahip olmaları da diğer avantajları arasındadır. Bunun yanı sıra düşük basınçta (1-2 bar) çalışabilirler. Bu özellikleri nedeniyle PEM yakıt pilleri,

birçok avantaja sahiptirler. Ancak yüksek saflıkta hidrojen gazına ihtiyaç duyarlar ve pahalı katalizörler kullanırlar. Ayrıca harici reaktif gazlara ihtiyaç duyabilirlikleri dezavantaj oluşturabiliyor (Erdinc & Uzunoglu, 2010). Membranın ana görevi, hidrojen iyon iletişimini anot ve katot arasında dış devrenin yardımıyla sağlamaktır ve reaksiyona giren hidrojen ve oksijeni birbirinden ayırır. Şekil 6'da gösterilen örnekte olduğu gibi genellikle membran malzemesi olarak Nafion membranlar kullanılır.



Şekil 6:

PEM Yakıt Hücresi Proton Membran Örneği (Gürbüz, 2021)

Membran kuru kalırsa protonların taşınması için yeterli sayıda asidik iyon (nafion) bulunmayacaktır (Diaz et al., 2014). MEA için, katalizör kaplı membran (CCM), katalizör kaplı substrat (CCS) ve katalizör kaplı elektrot (CCE) gibi çok sayıda üretim yöntemi mevcuttur. Bu yöntemlerden, CCE, Bhosale ve ark. (Bhosale et al., 2020) tarafından yayınlanan çalışmaya göre diğerlerine kıyasla en etkili ve verimi yüksek yöntemdir. Bununla birlikte, Shahgaldi ve ark. (Shahgaldi et al., 2018) her MEA üretim yöntemi üzerine gerçekleştirdiği deney sonucunda CCM yönteminin yüksek performans gösterdiğini belirttiler. Ek olarak, CCM, Huah et al. (Lim et al., 2021) tarafından yapılan bir incelemeye göre birçok araştırmacı tarafından desteklenen genel olarak en iyi yöntemdir. Jourdani ve ark. PEM yakıt hücresinin performansına membran kalınlığının etkisini sayısal olarak incelendiler. Onlar dört farklı membran kalınlığının ($125\text{e-}6\text{ m}$, $100\text{e-}6\text{ m}$, $75\text{e-}6\text{ m}$, $50\text{e-}6\text{ m}$) etkisini çalıştılar. Sonuç olarak membran kalınlığının azalması ile yüksek akım yoğunluğu elde ettiklerini rapor ettiler (Jourdani et al., 2017). Xia ve ark. çalışma sıcaklığı, membran kalınlığı ve kataliz tabakası kalınlığı gibi fiziksel parametrelerin PEM yakıt hücresi performansına etkilerini sayısal model üzerinden analiz ettiler. Onlar membran ve katalizör tabakasının kalınlığı azaldıkça performansının arttığının sonucuna vardılar (Xia et al., 2018).

MEA üç bölüme ayrılmıştır. İlk olarak, gaz difüzyon tabakası esas olarak politetraflor etilen (PTFE) ile kaplı karbon kâğıdından yapılmıştır; Her iki reaktant da gaz gözeneklerine yayılır ve daha sonra katalizör tabakasına akarlar. Buna ek olarak, membranın verimli çalışmasını sağlamak için su tutma ve su salınımını da korur. İkincisi, Platin (Pt) katalizörün ince nano parçacıkları, membran veya gaz difüzyon tabakası (GDT) hem anot hem de katot taraflarında eşit olarak dağılır. Son olarak, membran yakıt hücresinin en önemli ve en maliyetli kısmıdır. Katalizör tabakası tarafından üretilen protonlar (H^+) bu zardan bir taraftan diğerine akar ve dış devreden elektrik üreten bir elamdır. Ayrıca reaksiyonlar sonucunda yan ürün olarak su oluşturur. Bu nedenle, bu iyonlar için bir geçittir. İnsanların yakıt hücresine olan ilgisi arttıkça, araştırma, geliştirme ve pazar büyüklüğü de artmaktadır. Uluslararası bültene göre, yakıt hücresi endüstrilerinin piyasa değeri 2025 yılına kadar 24,8 milyar dolar olacaktır (Parekh, 2022).

PEM yakıt hücrelerinin kullanımında hala karşılaşılan temel zorluklar maliyet ve dayanıklılıktır. PEM yakıt hücresi yığınındaki maliyetlerin ayrıntılı bir şekilde incelendiğinde, katalizörün, membranın, bipolar plakaların, elektrotların ve keçelerin, gaz difüzyon katmanının ve diğer bileşenlerin maliyetine göre %41'lik bir katkı sağladığını göstermektedir. Bu durum, işlenen malzemelerin maliyeti ve üreticinin karı ile ilgilidir ve özel Pt katalizörlerinin işlenmemiş Pt metalinden daha pahalı olmasına neden olmaktadır. Yakıt hücrelerinin uzun vadede rekabetçi

kalabilmesi için, maliyetlerin kW başına net 30 ABD dolarına kadar düşürülmesi önemlidir ve bu, yüksek hacimli piyasalarda membran maliyetinde 1,35\$/kW azalma anlamına gelecektir (Agyekum et al., 2022). Devanathan (Devanathan, 2008), son yıllarda proton değişim zarındaki gelişmeleri kapsamlı kimyası ile ortaya çıkarmıştır. Proton tipi membran, yakıt hücresine elektrolit olarak monte edilir. PEMFC için bazı sınırlamalar vardır. Birincisi 80°C'nin üzerinde verimli bir şekilde çalışmaz, çünkü yüksek çalışma sıcaklığı aşırı nemlenme oluşturur ve yakıt hücresi içinde yoğunlaşır. İkincisi, çalışma sıcaklığı düştükçe CO toleransı azalır Zhang, (L. Zhang et al., 2012). Üçüncüsü, PEM en pahalı kısım olduğu için tüm montajın maliyeti diğer yakıt hücrelerinden daha yüksektir. Dördüncüsü, -5 °C, -10 °C, -15 °C ve -20 °C'de yığının soğuk başlatması öncesinde ve sonrasında kutuplama eğrileri ölçülmüştür. Başarılı soğuk başlatma sırasında yığının kutuplama eğrisinde açık bir bozulma olmadığı tespit edilmiş ancak, başarısız soğuk başlatma sırasında yığının genel performansı açıkça azaldığı tespit edilmiştir (R. Lin et al., 2019). Yakıt hücresi performansını ve akım yoğunluğu homojenliğini artırmak için, nispi nemin dönüş noktası önerilebilir ve özellikle membranın kuruması ve hidrasyonun dengeli etkileri, hücrede uygun su içeriği ve yerel su taşmasının önlenmesi nedeniyle önerilir. Yakıt hücresinin giriş ve çıkış kısımlarına yakın akım dağılımına gelindiğinde, çıkış kısımlarındaki performans her zaman daha kötüdür ve bu işletme koşullarının optimizasyonu ile yüksek derecede geliştirilemez. Bunun nedeni, akış kanalı boyunca kaçınılmaz hava tüketimi ve su birikmesidir. Bu sorunu çözmek için, kanal alanının şekli iyileştirilebilir (Q. Zhang et al., 2016).

4. GAZ DİFÜZYON TABAKASI (GDT)

Gaz difüzyon tabakası (GDT), özellikle optimal olmayan sıvı su taşıma nedeniyle kütle taşıma kontrol rejiminde, bir PEM yakıt hücresinin genel performansında kritik bir rol oynar. Su, katalizör tabakasındaki ve gaz difüzyon katmanındaki gözenekli yolları tıkar ve bu nedenle kanaldan aktif reaksiyon sitelerine kadar olan oksijen taşınımını engeller. Bu fenomen "flooding(sel)" olarak bilinir ve hücre performansındaki sınırlayıcı akım davranışına neden olan temel mekanizma olarak algılanır (Mukherjee et al., 2010). Katot GDT'nin gözenek morfolojisi ve ıslanma özellikleri, etkili bir PEMFC su yönetiminde büyük öneme sahiptir. Tipik olarak, kullanım ömrünün başlangıcındaki GDT'ler hidrofobik özellikler sergilerler, bu da sıvı su taşınımını kolaylaştırır ve dolayısıyla "flooding"i azaltır. Ancak, deneysel veriler, GDT'nin uzun süreli PEMFC çalışmasına maruz kaldığında hidrofobisini kaybettiğini ve artan "flooding"e eğilimli hale geldiğini göstermektedir (Mukherjee et al., 2010). Gaz difüzyon tabakası, önemli bir bileşen olup, yakıt hücresinde katalizör kullanımını ve performansı kontrol eder. GDT, anot ve katot elektrotlar arasında yer alır ve gazların katalizöre ulaşmasını sağlar. Aynı zamanda, su buharını membrana ileterek membranın nemliliğini ve iyon iletkenliğini korurken, katalizör tabakası ile membran arasındaki suyun tahliyesini sağlar. Bu şekilde, GDT yakıt hücresinin verimli çalışmasını sağlar (Park et al., 2012).

GDT'ler içindeki taşıma, yakıt hücresi enerji dönüşümünde önemli bir rol oynar. GDT'ler genellikle 100–300 µm kalınlığındadır. Popüler bir GDT malzemesi, karbon elyafı bazlı gözenekli ortamdır: elyaflar ya bir kumaş oluşturmak için birbirine dokunur ya da bir kağıt oluşturmak için reçinelerle birbirine bağlanır. Ralph ve diğerleri (Ralph et al., 1997) karbon kumaşının dahili nemlendirme ile yüksek akımda (>0.5 Acm²) karbon kağıdından daha iyi bir performans sergilediğini gösterdi. Wang ve ark. (Wang et al., 2007) karbon kumaşın ve karbon kağıdın yapısal özelliklerini karakterize etti ve gözlemlenen farklı performans için bir açıklama sağladı. GDT mikro yapısını yeniden yapılandırmak için birkaç stokastik model geliştirilmiştir. Jang ve ark. (Jang et al., 2006) tarafından yapılan çalışmada, hücre performansı ve kütle geçişi üzerindeki etkilerini incelemek için

GDT karakteristik parametreleri için çift fazlı iki boyutlu bir model oluşturulmuştur. GDT kalınlığının etkileri araştırılmıştır ve GDT'nin gözenekliliği 0.3-0.6 aralığında tutularak analizler yapılmıştır. Dolayısıyla, GDT'nin yapısal olarak gözeneklerinin artması hücre performansını artırmaktadır, ancak GDT kalınlığının artması hücre performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Dört farklı GDT kalınlığının performansa etkilerini analiz yapmışlardır. Çeşitli GDT kalınlıkları için sıcaklığa, hücre potansiyeline, havanın debisine ve basınca göre akım yoğunluğunun değişimi incelenmiştir. Tablo 1'de, 0.1 mm, 0.2 mm, 0.3 mm ve 0.4 mm GDT kalınlıkları için farklı hücre potansiyellerinde elde edilen akım yoğunlukları verilmiştir (Ozdogan et al., 2017.)

Tablo 1. Farklı GDT kalınlıkları için akım yoğunluğunun hücre potansiyeline göre değişimi (T=333 K, P=200 kPa)

| Hücre Potansiyeli [V] | Akım yoğunluğu [A/cm^2] | | | |
|-----------------------|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|
| | GDT 0.1mm | GDT 0.2mm | GDT 0.3mm | GDT 0.4mm |
| 0.40 | 1.720 | 1.794 | 1.765 | 1.708 |
| 0.45 | 1.611 | 1.717 | 1.719 | 1.681 |
| 0.50 | 1.493 | 1.618 | 1.659 | 1.636 |
| 0.55 | 1.354 | 1.499 | 1.553 | 1.563 |
| 0.60 | 1.204 | 1.358 | 1.429 | 1.457 |
| 0.65 | 1.036 | 1.192 | 1.266 | 1.295 |
| 0.70 | 0.844 | 0.969 | 1.000 | 1.003 |
| 0.75 | 0.589 | 0.623 | 0.625 | 0.621 |
| 0.80 | 0.259 | 0.266 | 0.265 | 0.264 |
| 0.85 | 0.039 | 0.040 | 0.038 | 0.041 |
| 0.90 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 |

Analizler 333 K sıcaklıkta, $1.560 \cdot 10^{-6}$ kg/s havanın debisi ve 200 kPa basınçta yapılmıştır. En yüksek akım yoğunluğu, 0.2 mm GDT kalınlığına sahip tabakada 0.40V hücre potansiyeli için $1.794 A/cm^2$, 0.40 mm GDT kalınlığına sahip tabakada ise $1.708 A/cm^2$ değeri ile elde edilirken en düşük akım yoğunluğu ise 0.4 mm GDT kalınlığına sahip tabakada gözlenmiştir. 0.3 mm GDT kalınlığına sahip geometride, 0.45V ve 0.50V hücre potansiyelleri için en yüksek akım yoğunluğu elde edilirken, en düşük akım yoğunluğu 0.1 mm GDT kalınlığına sahip geometride meydana gelmektedir. GDT kalınlığı arttıkça, 0.55-0.75 hücre potansiyeli aralığında elde edilen akım yoğunluğu artmaktadır. Dört farklı GDT kalınlığı için elde edilen sonuçlar, hücre potansiyeli 0.75V üzerine çıktığında benzer değerler vermektedir (Ozdogan et al., 2017.).

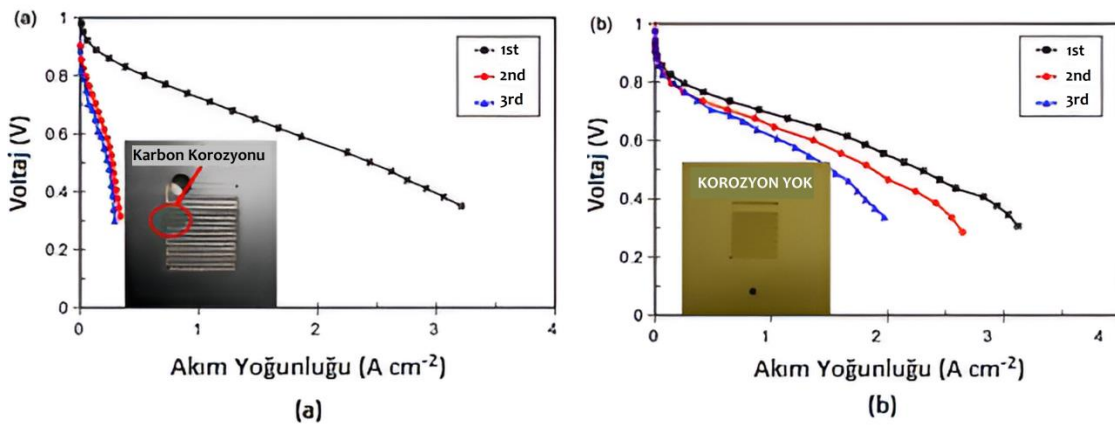
GDT'nin genişliğinin etkisi çok düşük seviyededir, ancak $0.6 A/cm^2$ ile $1.6 A/cm^2$ aralığındaki akım yoğunlukları için GDT kalınlığının artması, hücre potansiyelini arttırdığı görülmüştür (Ozdogan et al., 2017.). Çalışmanın sonuçlarına göre, tüm durumlarda GDT kalınlığı arttıkça 0.6 V'deki akım yoğunluğunun arttığı görülmüştür. Ayrıca, GDT kalınlığının hücre potansiyeli ve güç miktarı üzerindeki etkisi, GDT kalınlığı düşük olduğunda daha belirgin hale gelmiştir (Ozdogan et al., 2017.).

5. BİPOLAR PLAKA

En dıştaki hücre bileşeni olarak, bipolar plakalar (BPP) tek hücreler için MEA'yı destekler ve yığın için ayırıcı görevi görür. Ek olarak, BPP'ler yakıt ve oksidan dağıtımına, mevcut toplamaya, ısı ve su yönetimine de yardımcı olur (Jung et al., 2009; M.-T. Lin et al., 2013). Yakıt ve oksidan katalizör tabakasına verimli bir şekilde dağıtıldığında, hücredeki su etkin bir biçimde yönetilerek üretilen akım etkin bir halde toplanmaktadır. MEA'nın tamamının daha iyi kullanılması için, akış kanalları genellikle bipolar plakaların yüzeylerinde işlenmektedir (Eroğlu, L. 2023).

Kaliteli ve tercih edilmesi uygun BPP'ler, geçirgenlik durumunun olmaması, yüksek ısıl iletkenlik, düşük arayüzey temas direnci, iyi mekanik dayanım, yüksek korozyon direnci, hafiflik, maliyet etkinliği, vb. gibi özelliklere sahip olmalıdır. PEMFC için uygun BPP'ler hakkında daha spesifik bir inceleme çalışması Dihrab ve diğerleri tarafından yayınlanmıştır (Dihrab et al., 2009).

Grafit, PEMFC'lerde BPP'ler olarak genellikle yüksek elektriksel iletkenliği, yüksek kimyasal stabilitesi ve iyi hidrofobikliği nedeniyle kullanılmaktadır, ancak zayıf mekanik dayanıklılığı ve üretilebilirliği gibi dezavantajları da vardır. PEMFC'ler için, elektrokimyasal modda yüksek pozitif aşırı potansiyel ve asidik çevre, grafit bazlı BPP'ler üzerinde ciddi korozyona neden olabilir. Bu, elektrotlar ve BPP'ler arasındaki zayıf elektriksel temasın yanı sıra BPP'lerin hidrofobikliğinin azalmasına yol açabilir, bu da ohmik direnci ve kütle taşıma kayıplarını artırabilir. Bu, yakıt hücresinin performansını olumsuz etkileyebilir ve bakım gereksinimlerini artırabilir. Bu nedenle, yakıt hücresi tasarımında malzeme seçimi ve çevresel koşulların dikkate alınması önemlidir (Jung et al., 2009). Karbon ile karıştırılmış polimer kullanmak grafitin zayıf üretilebilirliğini iyileştirebilir. Ancak elektriksel iletkenliğin zayıflamasından muzdarip olur. Karbon bazlı malzemeler yerine, yüksek mekanik dayanıklılığı, geçirimsizliği, mükemmel üretilebilirliği ve uygun maliyetli olmaları nedeniyle metal bazlı BPP'ler iyi bir alternatif olarak önerilmektedir. Metal, titanyum, paslanmaz çelik, alüminyum, bakır alaşımları, nikel vb. malzemeler olabilir. Şekil 7'de gösterildiği gibi hücreyi her gün 1 saat 2,0 V'ta çalıştırdıktan sonra altın (Au) kaplı titanyum bipolar plakalar (Ti-BPP), 5 kat daha düşük voltaj bozulma oranı ile karbon bazlı BPP'lerde oluşan Şekil 7(a) da kırmızı dairede gösterildiği gibi karbon korozyonu nedeniyle çok daha iyi stabilite sergilediği gösterilmiştir (Jung et al., 2009).

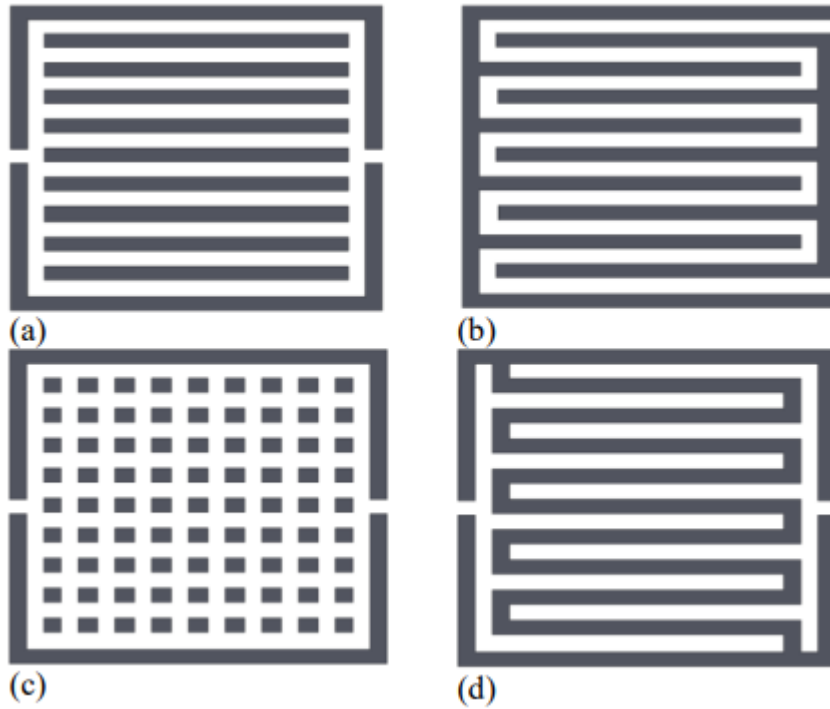


Şekil 7:

PEMFC performansının kararlılığı (Jung et al., 2009) (a) karbon bazlı BPP'ler; (b) Pt birikimli Ti-BPP'ler

Bipolar plakaların temel amacı, hücre yığınlarının oluşturduğu bir dizi pilde, hücreleri yapısal olarak bir arada tutarak desteklemektir. Ayrıca, gaz difüzyon tabakaları üzerinde yakıt ve oksidantın homojen bir şekilde dağıtılmasını kolaylaştırarak, aktif bölgede meydana gelen fazla akım ve ısıyı düzenleyerek, dışarı atılan suyun bir yan ürün olmasını sağlayarak ve gazların neme maruz kalarak sızmasını engelleyerek diğer işlevleri de içerir. En yaygın olarak kullanılan malzeme türü grafit tabakadır. Bipolar tabakanın yüzeyine yerleştirilen çeşitli akış kanalları, tercih edilen hücre geometrisine ve ihtiyaca bağlı olarak değişik tiplerde bulunabilir. Doğru seçim, hücre verimini ve performansını önemli ölçüde etkileyebilen düz, iğne ve kapalı gibi yaygın kullanılan tipleri içerir(Meral, P. 2019).

Literatürde yakıt pilleri için kullanılan birçok farklı akış alanı tasarımları bulunmaktadır. Bunlardan temel tasarım olarak kullanılan paralel, serpantin, iğne ve kapalı (interdigitated) tip akış alanı tasarımlar Şekil 8(a), 8(b), 8(c) ve 8(d)'de verilmiştir.



Şekil 8:

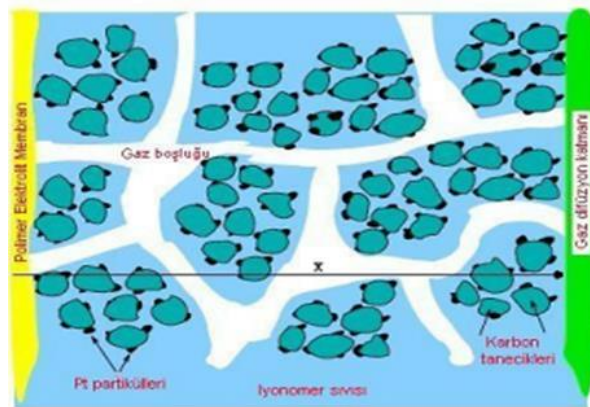
Literatürde yaygın olarak kullanılan akış geometrileri(ÇELİK, S. 2018).

Bununla birlikte, BPP'lerin yüksek yüzey alanı dikkate alındığında, Au veya Pt kaplama oldukça pahalı olabilir. Maliyeti düşürmek için titanyum-gümüş (Ti-Ag) filmi (H. Zhang et al., 2011), titanyumgümüşnitrid (Ti-Ag-N) filmi (M. Zhang et al., 2012) veya titanyum ve zirkonyum (Zr) ile nitrit (Ti, ZrN) kaplaması (M.-T. Lin et al., 2013b) kullanılmıştır, bu da PEMFC'lerin döngü stabilitesini geliştirebilir. Korozyon direnci iyileştirmesinin yanı sıra, yakıt, oksidan ve suyun daha iyi yönetimini sağlamak için akış kanalı optimizasyonu BPP'ler için bir başka önemli husustur. Ayrıca, metal bipolar plaka örneklerinin yüzeyine uygulanan kaplamalarla korozyon dirençlerinin artırılması üzerine çalışmalar yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda kaplanmış örneklerin daha iyi korozyon direncine sahip olduğu görülmüştür. Örneklerin yüzey pürüzlülüklerinin azaltılması ve kaplama kalitesinin artırılmasıyla korozyon direnci daha da artırılabilir (Kahraman, 2010).

Metaller ve grafit, bipolar plakaların üretimi açısından yakıt hücresi pazarına hâkim olmaya devam etse de, araştırmacılar yakıt hücresinin ömrünü uzatmak için metallerin kaplanması öneriyor. Bu, genel olarak yakıt hücresi fiyatlarını daha da düşürecektir (Wilberforce et al., 2019).

6. ELEKTROTLAR

Yakıt hücrelerinin elektrotları, 5-50µm kalınlığındaki katalizör tabakalarında gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlara dayanmaktadır. Elektrot tabakaları, membran yüzeyine doğrudan uygulanabileceği gibi gözenekli destek tabakaları üzerine de uygulanabilir. Her iki uygulama yöntemi de, katalizör ve membran parçacıklarının birbiriyle temas derecesinin proton hareketi için önemli olmasından dolayı, hücre performansını doğrudan etkileyen önemli bir kritik unsurdur (Yılmaztürk Güney, 2019.). Pt katalizörünün ilk PEM yakıt hücresi geliştirme yıllarında kullanım miktarı yaklaşık 28mg/cm² idi. Ancak, 1990'ların ortalarında destek malzemelerinin kullanılmasıyla birlikte bu miktar 0,3-0,4 mg/cm² civarına düşürülmüştür. Yüksek katalizör miktarının PEM yakıt hücresi maliyetini artırması ve tüm hücre yapısının yaklaşık %70'ini oluşturması nedeniyle, katalizör miktarını azaltmak için birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda katalizör miktarı 0,1 mg/cm²'ye kadar düşürülebilmektedir (Şahin, 2013). Elektrokimyasal reaksiyonların gerçekleştiği gözenekli elektrotun bulunduğu bölgede reaktan gazlar, katalizör ve elektrolit arasında üç fazlı bir arayüz oluşmaktadır. Bu arayüz hücre performansını önemli oranda etkilediğinden dolayı etkin bir üç faz sınırı oluşturulması ihtiyaç vardı (Kim et al., 2001) r. Elektrot tasarımında temel amaç, değerli metallerin kullanımını azaltarak düşük maliyetli ve çevre dostu çözümler geliştirmektir. Bu nedenle, ince film elektrotları tercih edilebilir çözümler arasındadır. Bu tür elektrotlar, Nafion gibi iyi bir proton iletkeni ile bağlandıklarında yüksek performans gösterirler. Ferng ve ark. PEM yakıt hücresinin gaz akış hızı elektrot kalınlığı ve gözenek yapısının performansa etkilerini araştırdı. Araştırmada elektrot kalınlığının ince olması ve daha küçük gözenekli olması PEM yakıt hücresi performansını olumlu yönde etkilediğini ifade etti (Ferng et al., 2014). Şekil 9'da gösterilen ince film elektrotu, büyük boyutlu karbon taneciklerinin üzerine yerleştirilmiş küçük platin partiküllerinden oluşan bir yüzey alanına ve gözenekli bir proton iletken katmana sahiptir. Bu elektrotlar genellikle mikron düzeyinde kalınlığa sahiptir ve platin içeriği 0.1 ila 0.4 mg/cm² arasında değişebilir.



Şekil 9:

Tipik bir elektrotun iç yapısı (Berg et al., 2006).

Elektrot, membran yüzeyine püskürtülerek, yapıştırılarak veya uygun diğer üretim yöntemleriyle yerleştirilir. MEA'nın yapısı, kullanılan membran kalınlığına bağlı olarak birkaç on mikrometreden yüzlerce mikrometreye kadar değişebilir (Aydın, 2007).

Bamos ve ark. oksijen indirgeme reaksiyonu için ağırlıkça %7,3 Zn/C katot ve %21,7 Pd elektrotunun performans etkisini irdediler. Hidrojen reaksiyonu için platinrutenyum PtRu elektrotunu kullandılar. Sonuçları ağırlıkça %29 Pt/C elektrotu ile karşıladılar. Polarizasyon eğrilerini kullandıkları karşılaştırma sonucunda güç yoğunluğu açısından, PEMFC tarafından en düşük performans ağırlıkça %21,7 Pd ve en yüksek performans ağırlıkça %29 Pt/C katot elektrotu ile sergilendi (Bamos & Bebelis, 2022). Begüm, PEM yakıt pillerinde elektrolizin performansını incelediği çalışmada karbon nanofiber (KNF) ve indirgenmiş grafen oksit(rGO) katalizörlerin döngüsel voltametri (CV) ve doğrusal taramalı voltametri (LSV) tekniği ile elektrokimyasal aktivitelerini ölçmüştür. Pt/rGOKNF ve Pt/KNF sentezledikleri katalizörler kıyaslandığında Pt/rGO-KNF hibrit katalizörlerin daha iyi sonuç verdiğini görmüştür (Kaplan, 2021.).

7. SONUÇLAR

Bu çalışma, PEM yakıt hücresi teknolojilerinin önündeki engelleri, membran ve katalizör tabakasının her ikisinin alternatif malzemeleri belirlenmesi, güncel durumunun değerlendirilmesi ve özetidir. Ayrıca bu makale, uygulama olanakları, özellikleri ve çalışma prensipleri arasındaki temel ancak kilit bağlantı üzerinde bir vurgu yapmaktadır.

- PEM yakıt hücresi teknolojisi özellikle ulaşım sektöründe oldukça güçlü avantajlara sahiptir.
- PEM yakıt hücresi teknolojisi kimyasal enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesinde daha yüksek verimlilik, düşük çalışma sıcaklığı, uzun kullanım ömrü ve neredeyse sıfır emisyon özellikleri nedeniyle hem ticari hem de taşımacılıkta oldukça önemli kullanım potansiyeline sahiptir.
- Yakıt hücresinin ticarileştirilmesini sağlamak ve maliyet ve dayanıklılıkla ilgili engelleri aşmak için daha fazla bilimsel çalışmalar yapılması gerekmektedir. Daha iyi korozyon direncine ve düşük Pt yüküne sahip MEA'lar, maliyet ve ömür hedeflerine ulaşmak için kritik öneme sahiptir. Malzeme geliştirmede atılımlar, uygun ve pratik bilgilerin edinilmesi, analitik modellerin ve deneysel araçların geliştirilmesi, mevcut yakıt hücresi gelişimi için özellikle önemlidir.
- Son yıllarda, PEMFC'lerin otomotiv endüstrisine sağladığı avantajlar göz önüne alındığında ilginin arttığı görülebilmektedir. Özel olarak, (MEA'dan oluşan) membran ve katalizör tabakası için, her ikisi de alternatif maliyet-etkin malzemeleri belirlemek ve geliştirmek için önemli ölçüde daha fazla araştırma gerektirir.
- PEM yakıt hücreli araçlar, uzun menzil sunma potansiyeline sahiptir. Bu, sürücülere daha uzun mesafeleri tek bir yakıt dolumu ile gitme olanağı sunar.
- Yakıt hücresinin performansını, su ve akım yoğunluğunu etkileyen ana etken reaktan gazların basıncı ve dağılımıdır. GDL'ler için, sıvı-su davranışlarını ve özellikle ortamın mikro yapısının etkileri iyi analiz edilmelidir. Membranın nemini korumak için suyun membranın üzerinde kalması, reaktan gazların geçişinin sağlanması için suyun tahliyesi optimum değerlerde sağlanmalıdır. Membranın kurumaması katot tarafındaki reaksiyonların hızının ve akım yoğunluğun azalmasına neden olmaktadır.
- Genel proton elektrolit malzemeleri için membran özelliklerinin performansla olan korelasyonlarına çok ihtiyaç vardır. Daha iyi korozyon direncine ve düşük Pt yüküne sahip MEA'lar, maliyet ve ömür hedeflerine ulaşmak için kritik öneme sahiptir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

YAZAR KATKI BEYANI

Gerçekleştirilen çalışmada Selman İLBEYOĞLU literatür taraması, makalenin yazılması başlıklarında; Hüseyin GÜRBÜZ fikrin oluşması, yorumlanması ve kontrolü, yönetim süreçleri, yazım denetimi ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesi başlıklarında katkı sağlamıştır.

KAYNAKLAR

1. Agyekum, E. B., Ampah, J. D., Wilberforce, T., Afrane, S., & Nutakor, C. (2022). *Research Progress, Trends, and Current State of Development on PEMFC-New Insights from a Bibliometric Analysis and Characteristics of Two Decades of Research Output. Membranes, 12(11)*, 1103. <https://doi.org/10.3390/membranes12111103>
2. Ali, A., Al-Othman, A., & Tawalbeh, M. (2023). Grand Challenges in Fuel cell Technology towards Resource Recovery. *Journal of Resource Recovery, 1(1)*. <http://doi.org/%2010.52547/jrr.2211.1004>
3. Alizadeh, E., Rahimi-Esbo, M., Rahgoshay, S. M., Saadat, S. H. M., & Khorshidian, M. (2017). *Numerical and experimental investigation of cascade type serpentine flow field of reactant gases for improving performance of PEM fuel cell. International Journal of Hydrogen Energy, 42(21)*, 14708–14724. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.04.212>
4. Awotwe, T. W., Alaswad, A., Mooney, J., & Olabi, A. G. (2015). *Hydrogen production for solar energy storage. A proposed design investigation. State of the Art on Energy Developments, 11*, 353.
5. Aydin, Murat. (2007). *PEM yakıt pilinin iki boyutlu modellemesi. . PhD Thesis. Enerji Enstitüsü. İstanbul.*
6. Bampos, G., & Bebelis, S. (2022). Performance of a Pd-Zn Cathode Electrode in a H₂ Fueled Single PEM Fuel Cell. *Electronics, 11(17)*, 2776. <https://doi.org/10.3390/electronics11172776>
7. Barbir, F. (2005). *PEM Fuel Cells-Theory and Practice* Elsevier Academic Press. *Burlilj Mon.*
8. Berg, P., Novruzzi, A., & Promislow, K. (2006). Analysis of a cathode catalyst layer model for a polymer electrolyte fuel cell. *Chemical Engineering Science, 61(13)*, 4316–4331. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2006.01.033>
9. Bhosale, A. C., Ghosh, P. C., & Assaud, L. (2020). Preparation methods of membrane electrode assemblies for proton exchange membrane fuel cells and unitized regenerative fuel cells: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 133*, 110286. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110286>
10. Blanco-Cocom, L., Botello-Rionda, S., Ordoñez, L. C., & Valdez, S. I. (2022). A Self-Validating Method via the Unification of Multiple Models for Consistent Parameter Identification in PEM Fuel Cells. *Energies, 15(3)*, 885. <https://doi.org/10.3390/en15030885>
11. Costamagna, P., & Srinivasan, S. (2001). Quantum jumps in the PEMFC science and technology from the 1960s to the year 2000: Part II. Engineering, technology development and application aspects. *Journal of Power Sources, 102(1–2)*, 253–269. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00808-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00808-4)

12. ÇELİK, S. 2018. Akış Kanalı Tasarımının Pem Yakıt Pili Performansına Etkilerinin İncelenmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(1), 407-416. doi: 10.28948/ngumuh.387275
13. Devanathan, R. (2008). Recent developments in proton exchange membranes for fuel cells. *Energy & Environmental Science*, 1(1), 101–119. doi: 10.1039/B808149M
14. Diaz, M., Ortiz, A., & Ortiz, I. (2014). Progress in the use of ionic liquids as electrolyte membranes in fuel cells. *Journal of Membrane Science*, 469, 379–396. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.06.033>
15. Dihrab, S. S., Sopian, K., Alghoul, M. A., & Sulaiman, M. Y. (2009). Review of the membrane and bipolar plates materials for conventional and unitized regenerative fuel cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6–7), 1663–1668. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.029>
16. Erdinc, O., & Uzunoglu, M. (2010). Recent trends in PEM fuel cell-powered hybrid systems: Investigation of application areas, design architectures and energy management approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 2874–2884. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.060>
17. Eroğlu, L. (2023). PEM yakıt hücresi diziliminde grafit akış kanallı gaz difüzyon tabakasının malzeme özelliklerinin incelenmesi (Master's thesis, Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
18. Ferng, Y. M., Su, A., & Hou, J. (2014). Parametric investigation to enhance the performance of a PBI-based high-temperature PEMFC. *Energy Conversion and Management*, 78, 431–437. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.10.069>
19. Gittleman, C., Jorgensen, S., Waldecker, J., Hirano, S., & Mehall, M. (2010). Automotive fuel cell R&D needs. *DOE Fuel Cell Pre-Solicitation Workshop. Department of Energy, Lakewood, Colorado*.
20. Gürbüz, Ö. Ü. H. (2021). Bölüm 4. *Modern Mühendislik Yöntemleri Ve Uygulamaları*, 85.
21. Islam, M. R., Shabani, B., Rosengarten, G., & Andrews, J. (2015). The potential of using nanofluids in PEM fuel cell cooling systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 523–539. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.018>
22. İÇİNGÜR, Y., & KİREÇ, L. (2011). Bir polimer elektrolit membran yakıt pilinde kullanılmak üzere gaz akış plakaları tasarımı ve denemesi. *Politeknik Dergisi*, 14(1), 31-37. Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2011.14.1, 31-37
23. Jang, J.-H., Yan, W.-M., & Shih, C.-C. (2006). Effects of the gas diffusion-layer parameters on cell performance of PEM fuel cells. *Journal of Power Sources*, 161(1), 323–332. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.03.089>
24. Jourdani, M., Mounir, H., & Marjani, A. (2017). Three-dimensional PEM fuel cells modeling using COMSOL multiphysics. *The International Journal of Multiphysics*, 11(4), 427–442.
25. Jung, H.-Y., Huang, S.-Y., Ganesan, P., & Popov, B. N. (2009). Performance of gold-coated titanium bipolar plates in unitized regenerative fuel cell operation. *Journal of Power Sources*, 194(2), 972–975. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.06.030>
26. Kahraman, H., & Orhan, M. F. (2017). Flow field bipolar plates in a proton exchange membrane fuel cell: Analysis & modeling. *Energy Conversion and Management*, 133, 363–384. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.10.053>
27. Kahraman, Hüseyin. (2010). *Polimer elektrolitik membran (pem) yakıt pillerinde kullanılacak metalik çift kutuplu plakanın geliştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
28. Kahveci, E. E., & Taymaz, I. (2014). Experimental investigation on water and heat management in a PEM fuel cell using response surface methodology. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(20), 10655–10663. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.04.195>

29. Kaplan, B. Y. (2022). Düzeltme: Polimer Elektrolit Membranli (Pem) Yakıt Pilleri İçin İndirgenmiş Grafen Oksit-Karbon Nanofiber Hibrit Destekli Platin Elektrokatalizörlerinin Geliştirilmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 27(1), 535–536. <https://doi.org/10.17482/uumfd.1027983>
30. Karaoğlan, M. U., Kuralay, N. S. 2014. "PEM Yakıt Hücresi Modeli," *Mühendis ve Makina*, cilt 55, sayı 657, s. 51-58
31. Kim, Chang-Soo, et al. Method for fabricating membrane and electrode assembly for polymer electrolyte membrane fuel cells. U.S. Patent No 6,180,276, 2001.
32. Lee, N. W., Kim, S. Il, Kim, Y. S., Kim, S. H., Ahn, B. K., & Kim, M. S. (2015). An effective discharge method for condensed water inside the GDL using pressure gradient of a PEM fuel cell. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 85, 703–710. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.02.028>
33. Lim, B. H., Majlan, E. H., Tajuddin, A., Husaini, T., Daud, W. R. W., Radzuan, N. A. M., & Haque, M. A. (2021). Comparison of catalyst-coated membranes and catalyst-coated substrate for PEMFC membrane electrode assembly: A review. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 33, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.07.044>
34. Lin, M.-T., Wan, C.-H., & Wu, W. (2013a). Comparison of corrosion behaviors between SS304 and Ti substrate coated with (Ti, Zr) N thin films as Metal bipolar plate for unitized regenerative fuel cell. *Thin Solid Films*, 544, 162–169. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2013.03.130>
35. Lin, M.-T., Wan, C.-H., & Wu, W. (2013b). Comparison of corrosion behaviors between SS304 and Ti substrate coated with (Ti, Zr) N thin films as Metal bipolar plate for unitized regenerative fuel cell. *Thin Solid Films*, 544, 162–169. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2013.03.130>
36. Lin, R., Zhu, Y., Ni, M., Jiang, Z., Lou, D., Han, L., & Zhong, D. (2019). Consistency analysis of polymer electrolyte membrane fuel cell stack during cold start. *Applied Energy*, 241, 420–432. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.091>
37. Lori, O., & Elbaz, L. (2020). Recent advances in synthesis and utilization of ultra-low loading of precious metal-based catalysts for fuel cells. *ChemCatChem*, 12(13), 3434–3446. doi.org/10.1002/cctc.202000001
38. Manso, A. P., Marzo, F. F., Barranco, J., Garikano, X., & Mujika, M. G. (2012). Influence of geometric parameters of the flow fields on the performance of a PEM fuel cell. A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(20), 15256–15287. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.07.076>
39. Mench, M. (2008). *Fuel Cell Engines*, John Wiley & Sons, Inc, ISBN, 978.
40. Meral, P. (2019). *Pem tipi yakıt hücrelerinde tasarım ve işletme parametrelerinin hücre performansına etkisi* (Master's thesis, Sakarya Üniversitesi).
41. Mukherjee, P. P., Mukundan, R., & Borup, R. L. (2010). Modeling of durability effect on the flooding behavior in the PEFC gas diffusion layer. *International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology*, 44045, 683–688. <https://doi.org/10.1115/FuelCell2010-33241>
42. Müller, M.-V., Giorgio, M., Hausmann, P., Kinlechner, L., Heinzl, A., & Schwämmlein, J. (2022). Investigation of the effect of carbon post-vs pre-coated metallic bipolar plates for PEMFCs—start-up and shut-down. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(13), 8532–8548. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.12.179>
43. Ozdogan, M., Namli, L., & Durmuş, A. (2017). *Gaz Difüzyon Tabakası Kalınlığının Pem Yakıt Hücrelerinin Performansına Etkisinin İncelenmesi*.
44. Öztürk, Y. E. (2023). Pem yakıt hücreli araçlarda termal ve su yönetim sistemlerinin teorik ve nümerik incelenmesi (Master's thesis, Bursa Uludağ Üniversitesi)
45. Özveren U., Dinçer S., "PEM Yakıt Hücrelerinin Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi", 7. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi, Eskişehir, Türkiye, 5 - 08 Eylül 2006

46. Parekh, A. (2022). Recent developments of proton exchange membranes for PEMFC: A review. *Frontiers in Energy Research*, 10, 956132. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.956132>
47. Park, S., Lee, J.-W., & Popov, B. N. (2012). A review of gas diffusion layer in PEM fuel cells: Materials and designs. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(7), 5850–5865. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.12.148>
48. Pollet, B. G., Kocha, S. S., & Staffell, I. (2019). Current status of automotive fuel cells for sustainable transport. *Current Opinion in Electrochemistry*, 16, 90–95. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2019.04.021>
49. Pourrahmani, H. (2022). Water management of the proton exchange membrane fuel cells: Optimizing the effect of microstructural properties on the gas diffusion layer liquid removal. *Energy*, 256, 124712. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124712>
50. Rahimi-Esbo, M., Ramiar, A., Ranjbar, A. A., & Alizadeh, E. (2017). Design, manufacturing, assembling and testing of a transparent PEM fuel cell for investigation of water management and contact resistance at dead-end mode. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(16), 11673–11688. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.02.030>
51. Rahimi-Esbo, M., Ranjbar, A. A., Ramiar, A., Alizadeh, E., & Aghaee, M. (2016). Improving PEM fuel cell performance and effective water removal by using a novel gas flow field. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(4), 3023–3037. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.11.001>
52. Ralph, T. R., Hards, G. A., Keating, J. E., Campbell, S. A., Wilkinson, D. P., Davis, M., St-Pierre, J., & Johnson, M. C. (1997). Low cost electrodes for proton exchange membrane fuel cells: Performance in single cells and Ballard stacks. *Journal of the Electrochemical Society*, 144(11), 3845.
53. Rizwan, M., Mujtaba, G., Memon, S. A., Lee, K., & Rashid, N. (2018). Exploring the potential of microalgae for new biotechnology applications and beyond: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 394–404. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.034>
54. Scherer, G. G. (2004). Fuel Cells in Switzerland—A Brief Retrospective View. *Chimia*, 58(12), 824–825. ISSN 0009–4293.
55. Shafiee, S., & Topal, E. (2009). When will fossil fuel reserves be diminished? *Energy Policy*, 37(1), 181–189. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.08.016>
56. Shahgaldi, S., Alaefour, I., & Li, X. (2018). Impact of manufacturing processes on proton exchange membrane fuel cell performance. *Applied Energy*, 225, 1022–1032. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.086>
57. Sorensen, B. (2017). *Renewable energy: physics, engineering, environmental impacts, economics and planning*. Academic Press.
58. Şahin, A. (2013). *Yakıt Hücrelerinden Kullanılmak Üzere Nanokompozit Membran Sentezi ve Karakterizasyonu*. Yayınlanmamış Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
59. Şenpınar, A., & Gençoğlu, M. T. (2006). Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Çevresel Etkileri Açısından Karşılaştırılması. *Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi*, 4(2), 49–54.
60. Tzelepis, S., Kavadias, K. A., Marnellos, G. E., & Xydis, G. (2021). A review study on proton exchange membrane fuel cell electrochemical performance focusing on anode and cathode catalyst layer modelling at macroscopic level. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, 111543. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111543>
61. Wang, Y., Leung, D. Y. C., Xuan, J., & Wang, H. (2016). A review on unitized regenerative fuel cell technologies, part-A: Unitized regenerative proton exchange membrane fuel cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 961–977. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.046>

62. Wang, Y., Wang, C.-Y., & Chen, K. S. (2007). Elucidating differences between carbon paper and carbon cloth in polymer electrolyte fuel cells. *Electrochimica Acta*, 52(12), 3965–3975. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2006.11.01>
63. Whiston, M. M., Azevedo, I. L., Litster, S., Whitefoot, K. S., Samaras, C., & Whitacre, J. F. (2019). Expert assessments of the cost and expected future performance of proton exchange membrane fuel cells for vehicles. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(11), 4899–4904. <https://doi.org/10.1073/pnas.1804221116>
64. Wilberforce, T., Ijaodola, O., Ogungbemi, E., Khatib, F. N., Leslie, T., El-Hassan, Z., Thomposon, J., & Olabi, A. G. (2019). Technical evaluation of proton exchange membrane (PEM) fuel cell performance—A review of the effects of bipolar plates coating. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, 109286. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109286>
65. Xia, L., Zhang, C., Hu, M., Jiang, S., Chin, C. S., Gao, Z., & Liao, Q. (2018). Investigation of parameter effects on the performance of high-temperature PEM fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(52), 23441–23449. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.21>
66. Yilmaztürk Güney, S. (2019). *Pem Yakıt Hücreleri İçin Membran-Elektrot-Yiğınlarının Hazırlanması Ve Karakterizasyonu*. Doktora Tezi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
67. Zhang, H., Hou, M., Lin, G., Han, Z., Fu, Y., Sun, S., Shao, Z., & Yi, B. (2011). Performance of Ti–Ag-deposited titanium bipolar plates in simulated unitized regenerative fuel cell (URFC) environment. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(9), 5695–5701. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.01.154>
68. Zhang, L., Chae, S.-R., Hendren, Z., Park, J.-S., & Wiesner, M. R. (2012). Recent advances in proton exchange membranes for fuel cell applications. *Chemical Engineering Journal*, 204, 87–97. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.07.103>
69. Zhang, M., Hu, L., Lin, G., & Shao, Z. (2012). Honeycomb-like nanocomposite Ti-Ag-N films prepared by pulsed bias arc ion plating on titanium as bipolar plates for unitized regenerative fuel cells. *Journal of Power Sources*, 198, 196–202. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.10.022>
70. Zhang, Q., Lin, R., Técher, L., & Cui, X. (2016). Experimental study of variable operating parameters effects on overall PEMFC performance and spatial performance distribution. *Energy*, 115, 550–560. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.086>
71. Zhang, R., Lan, S., Xu, Z., Qiu, D., & Peng, L. (2021). Investigation and optimization of the ultra-thin metallic bipolar plate multi-stage forming for proton exchange membrane fuel cell. *Journal of Power Sources*, 484, 229298. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.229298>
72. Zhang, S., Yuan, X., Wang, H., Mérida, W., Zhu, H., Shen, J., Wu, S., & Zhang, J. (2009). A review of accelerated stress tests of MEA durability in PEM fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(1), 388–404. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.10.012>