

## Hidrojen PEM Yakıt Hücresinin Performansını Etkileyen Faktörler ve Genel Bir Değerlendirme

Selman İLBEYOĞLU<sup>1\*</sup>, Hüseyin GÜRBÜZ<sup>2</sup> ve Mutlucan BAYAT<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Enerji Bilimi ve Teknolojileri, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Şırnak Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup> Makine Mühendisliği Bölümü, Şırnak Üniversitesi, Türkiye

<sup>3</sup> Makine Mühendisliği Bölümü, Karabük Üniversitesi, Türkiye

\*(huseyinnurgurbuz@gmail.com)

**Özet** – Konvansiyonel enerji kaynakları, önemli bir sorun olan sınırlı rezervlere sahip olmaları ve ciddi zararlı kirlenici etkileri nedeniyle artık büyük bir endişe kaynağıdır. Bu nedenle, sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelme ihtiyacı her zamankinden daha büyük hale gelmiştir. İşte bu noktada, hidrojen enerjisi önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Hidrojen, temiz bir yakıt olarak kabul edilir ve çevreye zararlı emisyonlar oluşturmadan enerji üretimine katkıda bulunabilir. Hidrojenin kimyasal enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürüldüğü bir sistem olan direkt hidrojenli PEM yakıt hücresi, gelecekte büyük umutlar vaat eden bir enerji kaynağıdır. Bu yakıt hücresi teknolojisi, hidrojenin oksijenle birleşerek su oluşturduğu elektrokimyasal reaksiyonlar yoluyla elektrik enerjisi üretebilir. Bu süreç sırasında herhangi bir zararlı emisyon ortaya çıkmaz, çünkü temiz su buharı salınır. Bu çalışmada, PEM yakıt hücresinin performansına etki eden bileşenlerin ve çeşitli durumların incelendiği ortaya konulmuştur. İlk olarak, PEM yakıt hücresinin işleyiş sistemi detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Yakıt hücresinin parçaları ve bu parçaların yakıt hücresi yığın maliyetine olan etkisi değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, membran, gaz difüzyon tabakası, bipolar tabaka ve anot-katot elektrotları gibi unsurların, PEM yakıt hücresinin performansı üzerindeki etkileri dikkatlice araştırılmıştır. PEM yakıt hücresinde yapılan çalışmalar, membran kalınlığının azaldıkça performansın arttığını göstermiştir. Ayrıca, gaz difüzyon tabakasındaki su miktarının az veya aşırı olmasının, yakıt hücresi performansını sınırlayıcı bir etkisi olduğu belirlenmiştir. Grafit gibi yüksek elektrik iletkenliği olan ve korozyona dayanıklı bipolar plakaların, yakıt hücresi performansını artırdığı tespit edilmiştir. Elektrotların elektrik iletkenliği ve hidrojenin elektrot yüzeyine tutunma kabiliyeti arttıkça, performansın olumlu yönde etkilendiği gözlemlenmiştir.

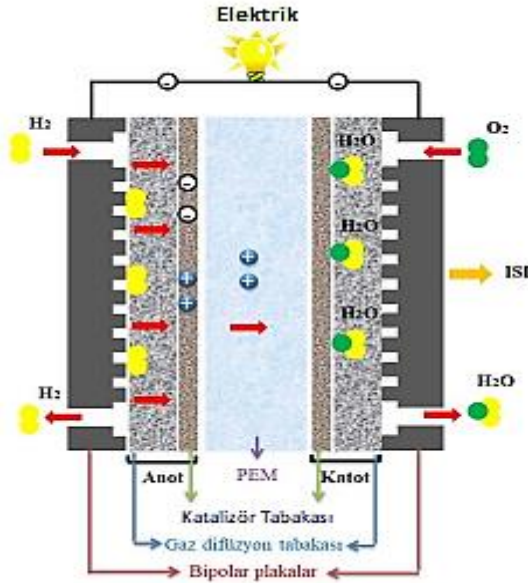
**Anahtar Kelimeler** – PEM Yakıt Pili, Yakıt Pili Performansı, Membran, Elektrot, Bipolar Plakalar

### I. GİRİŞ

Teknoloji ile gelişen yenedünyada yenilenemez enerji kaynaklarının yerini giderek yenilenebilir enerji kaynaklarının alındığı bilinmekte. 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. Yakıt hücreleri, enerji üretimi için sıfır emisyonlu ve verimli bir seçenek olarak kabul edilir. Özellikle

proton değişim membranı (PEM) yakıt hücreleri, yüksek güç yoğunluğu, hızlı başlangıç ve düşük işletme sıcaklığı gibi avantajları nedeniyle giderek popüler hale gelmektedir. Bu nedenle, PEM yakıt hücreleri gelecekte enerji üretiminde önemli bir rol oynayabilir. Bir PEM yakıt hücresinin çalışma prensibi Şekil 1'de gösterildiği üzere anot tarafından gaz yakıtlar, katot tarafından ise oksitleyici gazlar aktarılır. Anot kısmında yükseltgenme, katot kısmında ise indirgenme reaksiyonları gerçekleşir. Elektrotlar arasında

bulunan elektrolitte ise anottan katoda doğru bir iyon geçişi gerçekleşir[1].

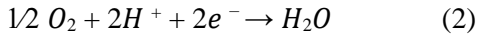


Şekil 1. Yakıt pili temel çalışma prensibi[2]

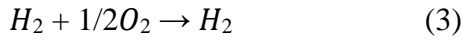
Anot tarafında: (Hidrojen yükseltgenme reaksiyonu)



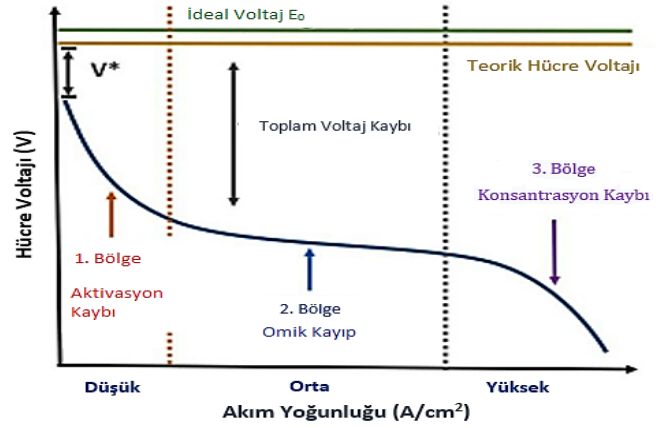
Katot tarafında: (Oksijenin indirgenme reaksiyonu)



Tüm reaksiyon:

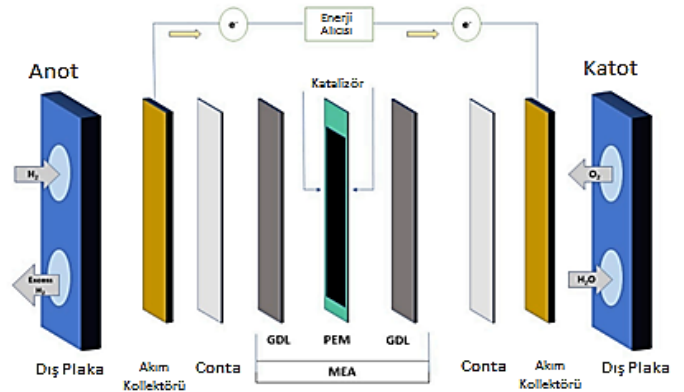


Yakıt hücresinde anot ve katot tarafında gerçekleşen reaksiyonlar denklem 1,2,3 te gösterilmiştir[3]. Elektrokimyasal reaksiyonun yan ürünleri su ve ısıdır. Hidrojenin kimyasal enerjisinin direkt hidrojenli PEM yakıt hücresinde elektrik enerjisine dönüştürülmesi incelenmiştir. Yakıt pilleri genel olarak verimli enerji üretim araçlarıdır ve PEM yakıt hücreleri hızlı başlama süresine sahip olmakla beraber daha az bakım gerektirirler[4]. Yakıt hücresinin performansı, voltaj-akım polarizasyon eğrisi kullanılarak ölçülür. Anot ve katot aktivasyon kayıpları eşit olarak değerlendirilse de, Katot tarafında oksijen indirgenme reaksiyonlarının yavaş olması nedeniyle kayıpların çoğu burada meydana gelir[5]. Hidrojen indirgenme reaksiyonu, anot tarafında hidrojen membranla karşılaştıktan sonra H<sup>+</sup> iyonlarına ve serbest elektronlara bölünür. H<sup>+</sup> iyonları, iyonik hareketi teşvik eden elektrolit boyunca ilerler ve PEM membranı boyunca doğrudan oksijenle karşılaştıkları katot tarafına taşınır. Dış devre boyunca elektron akışı bir döngüyü kapatır. Sonuç olarak, su, ısı ve elektrik enerjisi ürün olarak elde edilir.



Şekil 2. PEM yakıt hücresinin polarizasyon eğrisi[6]

PEM yakıt hücresi Şekil 3'te gösterildiği gibi genel olarak proton membran, anot ve katot elektrotlar, katalizör, bipolar plaka ve son dış plakalardan oluşur[7].

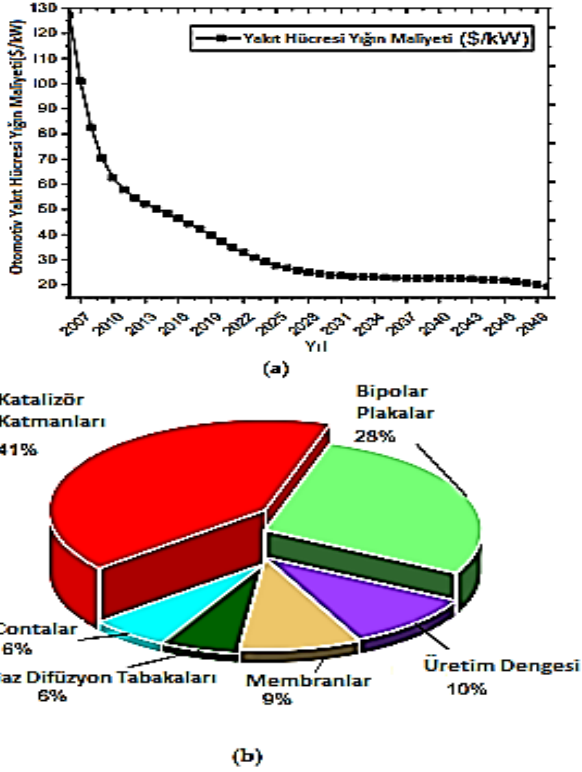


Şekil 3. Bir yakıt hücresi elemanlarının detaylı görünümü[8]

PEM yakıt hücreleri, seçici geçirgen özellikte proton iletken bir membran kullanarak çalışan yakıt hücreleridir. Düşük sıcaklıklarda, yüksek güç yoğunlukları ve yüksek enerji dönüşüm verimleri ile otomobiller ve sabit uygulamalar için potansiyel bir güç kaynağı olarak büyük ilgi görmektedir[9]. PEM yakıt hücrelerinin yüksek güç yoğunluğu, emisyonları ihmal edilebilirliği, sessiz çalışması ve modüler olarak konumlandırılabilirliği gibi birkaç benzersiz avantajı vardır[10]. PEM yakıt hücrelerinin maliyeti, ticarileştirilmesinin önündeki en büyük engellerden biridir[11]. Bu nedenle, Pt içermeyen alternatif katalizörlerin kullanımı araştırılmaktadır, ancak bunlar düşük seçicilikleri nedeniyle peroksit ara ürünleri oluşturma eğilimindedir ve dayanıklılık sorunları yaşanabilir[12]. Ayrıca, sistemin entegrasyonu ve montajı için de maliyetlerin azaltılması gerekmektedir [13].

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[14]

PEMFC teknolojisi mevcut durumda düşük yığın gücü yoğunluğundan kaynaklanan sorunlarla karşı karşıyadır. Hücre seviyesinde, katot aktivasyonunda, oksijen taşınmasındaki yüksek dirençte ve elektriksel elektrot/elektrolit temasındaki kayıplar önemli bir rol oynamaktadır[15]. Yığın seviyesi, soğutma sistemi ve yeni BP'lerin üretiminden de etkilenir. Bu yüzden, daha ince ve daha verimli BP'ler üretmek için çalışmalar hala devam etmektedir[16].

## II. 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 araştırmalar, bu süreçlerin anlaşılması ve daha iyi bir performans elde etmek için önemlidir.

### A. Proton Elektrolit Membran

PEM (Proton Exchange Membrane) yakıt pilleri, diğer yakıt pili sistemlerine kıyasla daha az karmaşık bir yapıya sahiptir ve birçok avantaja sahiptir. Örneğin, düşük sıcaklıklarda çalışabilirler ve atmosferik havayı kullanabilirler. Aynı zamanda yüksek gerilim, akım ve güç yoğunluğuna sahiptirler, kompakt ve sağlam bir yapıya sahiptirler ve basit bir mekanik tasarıma sahiptirler. Ayrıca düşük basınçta (1-2 bar) çalışabilirler. Ancak, PEM yakıt pillerinin bazı dezavantajları da vardır. Örneğin, yüksek saflıkta hidrojen gazına ihtiyaç duyarlar ve pahalı katalizörler kullanırlar. Ayrıca harici reaktif gazlara ihtiyaç duyabilirlikleri dezavantaj oluşturabilir[17].

Membranın ana görevi, hidrojen iyon iletimini anot ve katot arasında dış devrenin yardımıyla sağlamaktır ve reaksiyona giren hidrojen ve oksijeni birbirinden ayırır. Şekil 5'te gösterilen örnekte olduğu gibi genellikle membran malzemesi olarak Nafion membranlar kullanılır.



Şekil 5. PEM Yakıt Hücresi Proton Membran Örneği[18]

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<sup>+</sup>) bu zardan bir taraftan diğerine akar ve dış devreden elektrik üreten bir elmandır. 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[19].

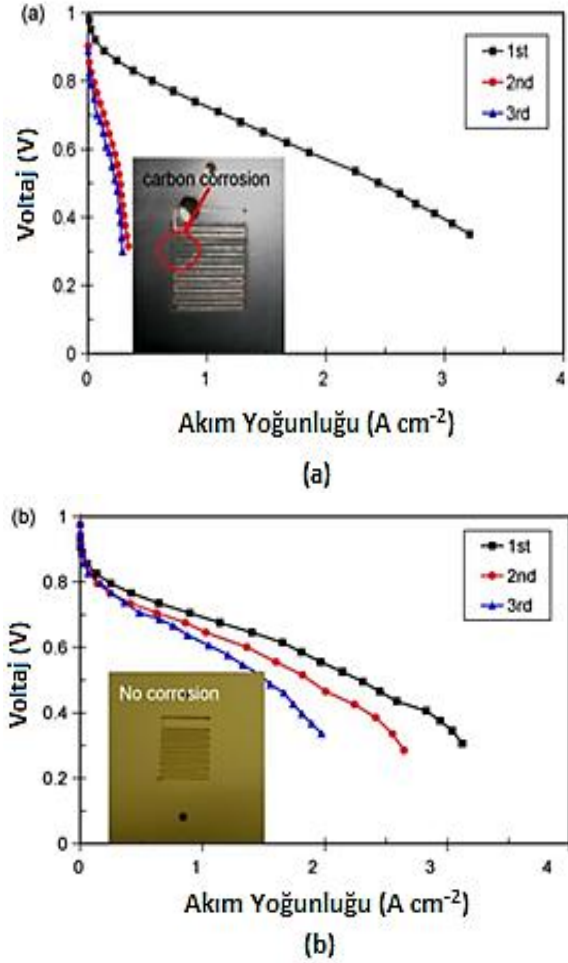
### B. Gaz Difüzyon Tabakası (GDT)

Gaz difüzyon katmanı (GDT), özellikle optimal olmayan sıvı su taşıma nedeniyle kütle taşıma kontrol rejiminde, bir proton elektrolit yakıt hücresinin (PEMFC) genel performansında kritik bir rol oynar. Sıvı 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[20]. Gaz difüzyon tabakası (GDT) 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[21]. GDT kalınlığının artması, hücre potansiyelini arttırdığı görülmüştür. GDT kalınlığı arttıkça akım yoğunluğunun arttığı görülmüştür. Ayrıca, GDT kalınlığının hücre potansiyeli ve güç miktarı üzerindeki etkisi, GDT kalınlığı düşük olduğunda daha belirgin hale gelmiştir[22].

### C. Bipolar 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[23]. Kaliteli ve tercih edilmesi uygun BPP'ler, geçirgenlik durumunun olmaması, yüksek ısı iletkenlik, düşük ara yüzey teması direnci, iyi mekanik dayanım, yüksek korozyon direnci, hafiflik, maliyet etkinliği, vb. gibi özelliklere sahip olmalıdır[24]. 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 6'da gösterildiği gibi hücreyi her gün 1 saat 2,0 V'ta

çalıştırdıktan sonra Au kaplı Ti-BPP'ler, 5 kat daha düşük voltaj bozulma oranı ile karbon bazlı BPP'lerden çok daha iyi stabilite sergiledi.



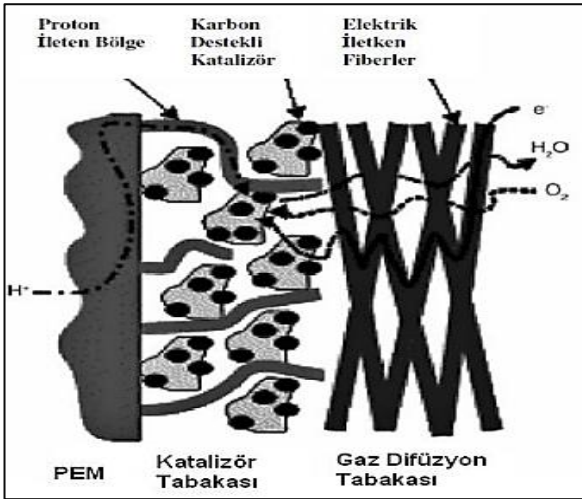
Şekil 6. PEMFC performansının kararlılığı (a) karbon bazlı BPP'ler; (b) Pt birikimli Ti-BPP'ler[23]

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[25]. Metaller ve grafit, bipolar plakaların üretimi açısından yakıt hücresi pazarına hâkim olmaya devam etse de, araştırmacılar yakıt hücresinin ömrünü uzatmak için metallerin kaplanmasını öneriyor. Bu, genel olarak yakıt hücresi fiyatlarını daha da düşürecek[26].

### D. 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[27]. 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[28]. Elektrot, membran yüzeyine püskürtülerek, yapıştırılarak veya uygun diğer üretim yöntemleriyle yerleştirilir. Membran ve elektrotları içeren yapıya membran-elektrot assembly (MEA) denir. MEA'nın yapısı, kullanılan membran kalınlığına bağlı olarak birkaç on mikrometreden yüzlerce mikrometreye kadar değişebilir[29]. Şekil 7'de bir elektrotun iç yapısı görülmektedir.



Şekil 7. Bir elektrotun iç yapısı[30]

### III. SONUÇLAR

Yapılan bu çalışmada, PEM yakıt hücresi teknolojilerinin önündeki engelleri belirlemek, membran ve katalizör tabakasının her ikisinin alternatif malzemelerini değerlendirmek ve güncel durumunun özetini sunmak amacıyla yapılmıştır. Bu araştırma ayrıca, PEM yakıt hücresi teknolojisinin uygulama olanakları, özellikleri ve çalışma prensipleri arasındaki temel ancak kritik bağlantıya odaklanmakta ve özellikle ulaşım sektöründe PEM yakıt hücresi teknolojisinin güçlü avantajlara sahip olduğunu vurgulamaktadır. PEM yakıt hücresi teknolojisi, kimyasal enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesinde üstün verimlilik, düşük çalışma sıcaklığı, uzun kullanım ömrü ve neredeyse sıfır emisyon gibi özelliklere sahip

olması sebebiyle ticari ve taşımacılık sektörlerinde son derece önemli bir kullanım potansiyeline sahiptir. Ticarileştirme sürecindeki yakıt hücresi teknolojisinin ilerlemesi ve maliyet ile dayanıklılık engellerini aşmak için daha fazla bilimsel araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Maliyet ve ömür hedeflerine ulaşmak için daha iyi korozyon direncine ve düşük Pt yüküne sahip MEA'ların geliştirilmesi kritik bir öneme sahiptir. Malzeme geliştirmedeki ilerlemeler, uygun ve uygulanabilir bilgilerin edinilmesi, analitik modellerin ve deneysel araçların geliştirilmesi, mevcut yakıt hücresi teknolojisinin ilerlemesi için özellikle önemlidir. Son yıllarda, PEM yakıt hücresinin otomotiv endüstrisine sağladığı avantajlar dikkate alındığında, ilgi artışı gözlemlenebilir. Özellikle, membran ve katalizör tabakasını oluşturan MEA için, hem membran hem de katalizör için alternatif, maliyet-etkin malzemelerin belirlenmesi ve geliştirilmesi konusunda daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Yakıt hücresinin performansını etkileyen önemli faktörlerden biri, reaktan gazların basıncı ve dağılımıdır, bu da su ve akım yoğunluğunu etkiler. GDL (Gaz Dağıtım Katmanı) ve MPL (Membran Proton Değiştirici Katmanı) için ise, sıvı-su davranışları ve özellikle ortamın mikro yapısının etkileri iyi bir şekilde analiz edilmelidir. Membranın nem seviyesini korumak için, suyun membran üzerinde kalması ve aynı zamanda reaktan gazların geçişine izin vermek için suyun tahliyesi, optimize edilmiş değerlerde gerçekleştirilmelidir. Membranın kuruması, katot tarafındaki reaksiyon hızının ve akım yoğunluğunun azalmasına neden olur. Genel olarak, proton iletken elektrolit malzemeleri için membran özelliklerinin performansla olan ilişkilerini anlamak için büyük bir ihtiyaç vardır. Maliyet ve ömür hedeflerine ulaşmak için, daha iyi korozyon direncine ve düşük Pt yüküne sahip MEA'lar (Membran-Elektrot Montajı), kritik bir öneme sahiptir. Bu özelliklere sahip MEA'ların geliştirilmesi, yakıt hücresi teknolojisinin daha ekonomik ve uzun ömürlü hale gelmesini sağlamaktadır.

### KAYNAKLAR

- [1] M. U. Karaoğlan And N. S. Kuralay, "Pem Yakıt Hücresi Modeli," Mühendis Ve Makina, Pp. 51–58, 2014.
- [2] Karanfil, G. (2020). Proton değişim membran yakıt hücreleri: Termodinamiği, bileşenleri ve uygulama Alanları. *Mühendis ve Makina*, 61(698), 57-76.

- [3] M. Mench, "Fuel Cell Engines, John Wiley & Sons," Inc, ISBN, p. 978, 2008.
- [4] Kroke, A. G. Olabi, D. Goričanec, and S. Božičnik, "Characterisation of Proton Exchange Membrane (PEMFC) Fuel Cell Through Design of Experiment (DOE)," in 10TH International Conference on Sustainable Energy and Environmental Protection Hydrogen and Fuel Cells, 2017, p. 37.
- [5] H. Gürbüz, "Hidrojen Enerjisi ve PEM Yakıt Hücresi Sistemi," Modern Mühendislik Yöntemleri Ve Uygulamaları, Iksad Publications, p. 85, 2021.
- [6] L. Blanco-Cocom, S. Botello-Rionda, L. C. Ordoñez, and S. I. Valdez, "A Self-Validating Method via the Unification of Multiple Models for Consistent Parameter Identification in PEM Fuel Cells," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 3, p. 885, 2022.
- [7] H. Kahraman and M. F. Orhan, "Flow field bipolar plates in a proton exchange membrane fuel cell: Analysis & modeling," *Energy Convers Manag*, vol. 133, pp. 363–384, 2017.
- [8] Parekh, Abhi. "Recent developments of proton exchange membranes for PEMFC: A review." *Frontiers in Energy Research* vol. 10 p.1-13, 2022.
- [9] Costamagna, Paola, and Supramaniam Srinivasan. "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 (2001): 253-269.
- [10] H. Pourrahmani, "Water management of the proton exchange membrane fuel cells: Optimizing the effect of microstructural properties on the gas diffusion layer liquid removal," *Energy*, vol. 256, p. 124712, 2022.
- [11] M.-V. Müller, M. Giorgio, P. Hausmann, L. Kinlechner, A. Heinzl, and J. Schwämmlein, "Investigation of the effect of carbon post-vs pre-coated metallic bipolar plates for PEMFCs—start-up and shut-down," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 13, pp. 8532–8548, 2022.
- [12] O. Lori and L. Elbaz, "Recent advances in synthesis and utilization of ultra-low loading of precious metal-based catalysts for fuel cells," *ChemCatChem*, vol. 12, no. 13, pp. 3434–3446, 2020.
- [13] M. M. Whiston, I. L. Azevedo, S. Litster, K. S. Whitefoot, C. Samaras, and J. F. Whitacre, "Expert assessments of the cost and expected future performance of proton exchange membrane fuel cells for vehicles," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 116, no. 11, pp. 4899–4904, 2019.
- [14] B. G. Pollet, S. S. Kocha, and I. Staffell, "Current status of automotive fuel cells for sustainable transport," *Curr Opin Electrochem*, vol. 16, pp. 90–95, 2019.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Gürbüz, Ö. Ü. H. (2021). Bölüm 4. *Modern Mühendislik Yöntemleri Ve Uygulamaları*, 85.
- [19] Parekh, A. (2022). *Recent developments of proton exchange membranes for PEMFC: A review*.
- [20] 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
- [21] 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.
- [22] Ozdogan, M., Namli, L., & Durmuş, A. (2017). *Gaz Difüzyon Tabakası Kalınlığının Pem Yakıt Hücresinin Performansına Etkisinin İncelenmesi*.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Kahraman, H. (2010). *Polimer elektrolitik membran (pem) yakıt pillerinde kullanılacak metalik çift kutuplu plakaların geliştirilmesi* (Doctoral dissertation, Sakarya Üniversitesi (Turkey)).
- [26] 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.
- [27] Yilmaztürk Güney, S. (2019). *Pem Yakıt Hücreleri İçin Membran-Elektrot-Yiğınlarının Hazırlanması Ve Karakterizasyonu*. Doktora Tezi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- [28] 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.
- [29] Aydın, Murat. (2007). *PEM yakıt pilinin iki boyutlu modellenmesi*. . PhD Thesis. Enerji Enstitüsü. İstanbul.
- [30] Uysal, Ümit, 2009, PEM yakıt pillerinin modellenmesi ve simülasyonu. MS thesis. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.