

AKAN ELEKTROLİTLİ DOĞRUDAN METANOL YAKIT PİLİNİN MODELLEMESİ

Can Özgür Çolpan

Yrd. Doç. Dr., Dokuz Eylül Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir
ozgur.colpan@deu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, Akan Elektrolitli-Doğrudan Metanol Yakıt Pili'nin, çeşitli koşullardaki voltajının ve güç yoğunluğunun bulunması için bir model geliştirilmiştir. Bu modelde, proton ve elektron taşınımı, süreklilik, momentum ve metanol, su ve oksijen türlerinin taşınımı gibi ana denklemler ile yardımcı denklemler birleştirilmiştir. Modelin sonuçları deneysel verilerle doğrulanmıştır ve çeşitli simülasyonlar yapılarak önemli giriş parametreleri incelenmiştir. Bu parametreler membranların, destek tabakalarının ve akan elektrolit kanalının kalınlıklarını içermektedir. Çalışmanın sonucunda, yakıt pilinin performansını arttırmak için, çalışılan parametrelerin kalınlıklarının mümkün olduğunca düşük olarak seçilmesinin gerektiği ve güç yoğunluğunun en yüksek değerinin 920.1 W m^{-2} olduğu bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Metanol, doğrudan metanol yakıt pili, akan elektrolit, modelleme, polarizasyon

Modelling of a Flowing-Electrolyte Direct Methanol Fuel Cell

ABSTRACT

In this study, a model of a Flowing-Electrolyte Direct Methanol Fuel Cell has been developed to find the performance of the cell under various operating conditions. In this model, governing equations including the proton and electron transport, continuity, momentum, species transport for methanol, water and oxygen and the auxiliary equations are coupled to determine the cell voltage and power density of the cell. After validating this model with the experimental data, several simulations are carried out to study the effects of the thicknesses of the membranes, backing layers, and flowing electrolyte channel on these parameters. The results of this study show that the thicknesses of these components should be taken as low as possible to improve the performance of the cell; and the highest value of the power density is found as 920.1 W m^{-2} .

Keywords: Methanol, direct methanol fuel cell, flowing electrolyte, modelling, polarization

Geliş tarihi : 22.12.2012
Kabul tarihi : 21.05.2013

Çolpan, C. Ö. 2013. "Akan Elektrolitli Doğrudan Metanol Yakıt Pili'nin Modellemesi," Mühendis ve Makina, cilt 54, sayı 642, s. 30-40.

1. GİRİŞ

Doğrudan Metanol Yakıt Pili (DMYP), gelecekte, taşınabilir güç uygulamalarında kullanılacak enerji teknolojilerinden birisidir. Aktif (kontrollü yakıt ve hava akımlı) ve pasif (doğal hava akımlı) türleri bulunan DMYP, dizüstü bilgisayar, dijital kamera, LCD-TV ve MP3 çalar gibi çeşitli cihazlarda kullanılabilir. Bu yakıt pili türünün, diğer yakıt pili türlerden ayıran en önemli özelliği yakıt olarak sıvı metanol kullanmasıdır. Bu yakıt kullanımının sağladığı avantajlar şu şekildedir: Kolay depolama, düşük maliyet ve yüksek enerji yoğunluğu. Bu avantajlarının yanı sıra katalizör gibi bazı bileşenlerinin yüksek maliyeti, DMYP'nin ticarileştirilmesinin önündeki en büyük engeldir. Yüksek maliyetinin yanı sıra metanol geçişinden ve anottaki metanol oksitlenmesinin düşük hızda gerçekleşmesinden dolayı düşük güç yoğunluğu ve elektrik verimi diğer dezavantajlarıdır [1, 2].

Akan Elektrolitli-Doğrudan Metanol Yakıt Pili (AE-DMYP) Kordesch ve çalışma arkadaşları tarafından geliştirilen yeni bir yakıt pili türüdür [3,4,5]. AE-DMYP, DMYP'ye göre bazı ilave tabakalar içermektedir. Örneğin, akan elektroliti katalizör tabakasından ayırmak için ilave bir membran ve seyreltik sülfürik asit solüsyonun akması için akan elektrolit kanalı bu tasarımda bulunmaktadır. Bu yeni yakıt pilinin geliştirilmesindeki temel amaç, performans düşüklüğüne neden olan, anottan katoda metanol geçişini engellemektir. Bu geçiş engellenerek katodik aktivasyon polarizasyonu azaltılmaktadır; fakat ilave edilen tabakalardaki proton geçişlerinden ötürü Ohmik polarizasyonda artış olmaktadır [6]. İlaveten, eğer akan elektrolit kanalından çıkan metanol, sülfürik asitten ayrılabilir ve yakıt kanalı girişine geri gönderilebilir ise yakıt pilinin performansı daha da artırılabilir. AE-DMYP, DMYP'ye göre genel olarak performans artışı sağlamaktadır; fakat ilave edilen tabakalar dolayısıyla, bu yakıt pilinin uygulama alanları daha kısıtlıdır. Örneğin, bu yakıt pili kamp yapma gibi eğlence aktivitelerinde, golf arabalarında ve istif makinelerinde destek güç ünitesi olarak kullanılabilir.

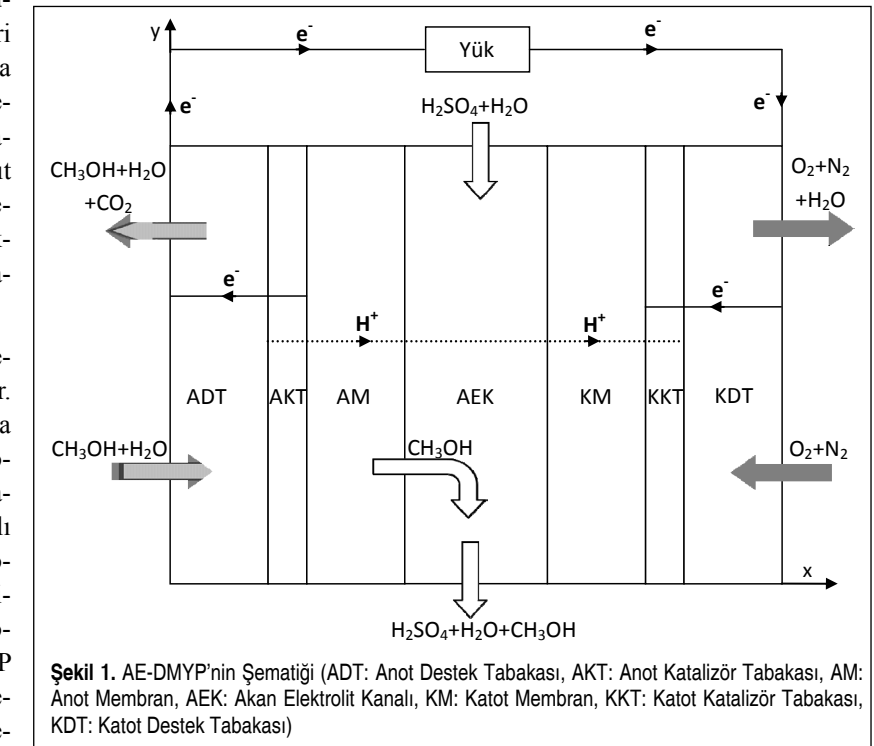
Yakıt pillerinin performans değerlendirmeleri modelleme çalışmalarıyla yapılabilir. DMYP'nin modellemesi üzerine son yıllarda basılan makaleler, genellikle, çok boyutlu modellemeler [7,8,9,10], iki fazlı taşınımı kapsayan modellemeler [9-11] ve ince membranlı DMYP'lerde detaylı su taşınımını içeren modellemeler [12, 13] üzerine yoğunlaşmıştır. Literatürde çok fazla sayıda DMYP üzerine modelleme çalışması olmasına karşın, AE-DMYP üzerine çok az sayıda makale basılmıştır. Örneğin, Kjeang vd. [14,15] çeşitli giriş parametre-

lerinin akan elektrolit kanalındaki metanol geçişi üzerindeki etkisini çalışmıştır. Çolpan vd. [6,16] AE-DMYP modelleri geliştirerek, çeşitli parametrelerin (girişteki metanolün konsantrasyonu, akan elektrolit kanalından geri dönüşüm, akan elektrolitin hacimsel akış hızı, yakıt, hava ve akan elektrolit kanalları girişindeki akışkanın hızı gibi) yakıt pilinin performansı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu çalışmalar göstermiştir ki DMYP ve AE-DMYP'nin güç yoğunlukları hemen hemen aynıdır; fakat geri dönüşümlü AE-DMYP'nin elektrik verimi, DMYP'ye göre çok daha yüksektir. İlaveten, yüksek güç yoğunlukları elde etmek için yakıt, hava ve akan elektrolit kanal girişlerindeki akışkan hızlarının artırılması gerektiği bulunmuştur. Ouellette vd. [17] iki fazlı bir model geliştirerek CO_2 oluşumunun AE-DMYP'nin performansı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu çalışmanın sonucunda, CO_2 'nin varlığının, metanol geçişini ve yakıt pilinin aktif alanını azalttığı bulunmuştur.

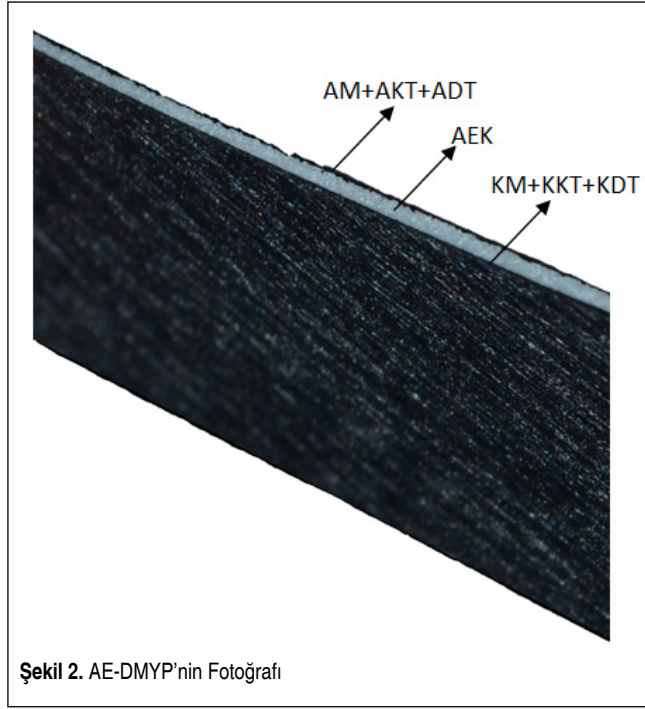
Yakıt pilini oluşturan tabakaların kalınlığının seçimi, yakıt pilinin performansı üzerinde çok önemli bir etkiye sahiptir. Yapılan literatür araştırması göstermiştir ki, bu tabakaların kalınlığının AE-DMYP üzerindeki etkisi daha önce yeterli olarak çalışılmamıştır. O sebeple, bu çalışmada bir model geliştirilerek, membranlar, destek tabakaları ve akan elektrolit kanalı kalınlıklarının performans üzerindeki etkisi çalışılmıştır.

2. MODELLEME

Proton ve elektron taşınımı, süreklilik, momentum ve meta-



Şekil 1. AE-DMYP'nin Şematiği (ADT: Anot Destek Tabakası, AKT: Anot Katalizör Tabakası, AM: Anot Membran, AEK: Akan Elektrolit Kanalı, KM: Katot Membran, KKT: Katot Katalizör Tabakası, KDT: Katot Destek Tabakası)



Şekil 2. AE-DMYP'nin Fotoğrafi

nol, su ve oksijen türlerinin korunumu denklemleri, yardımcı denklemlerle birleştirilerek Şekil 1'de şematiği ve Şekil 2'de fotoğrafı gösterilen AE-DMYP'nin modellemesi gerçekleştirilmiştir. Bu denklemlerle ilgili detaylar alt kısımlarda sunulmuştur [16].

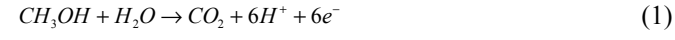
Bu modelde kullanılan temel varsayımlar aşağıdaki gibidir [16]:

- Bir tabakadaki protonik ve elektronik iletkenliklerdeki değişiklikler ihmal edilmiştir.
- CO₂ kabarcıkları ve su buharı oluşumu ihmal edilmiştir (tek fazlı modelleme yapılmıştır).
- Membranlar tamamen sulu haldedir.
- Sadece yakıt pilinin kalınlığı yönündeki transport olguları hesaba katılmıştır (1-boyutlu modelleme yapılmıştır).
- Metanol katot membranı ve katot katalizör tabakası kesiminde tamamen harcanmıştır.
- Kanal eğriliğinin etkileri hesaba katılmamıştır.
- Elektrolit kanalındaki akım tamamen oluşmuş laminar akımdır.
- Yakıt pili izotermaldir.
- Yakıt pili kararlı hâl durumunda işlemektedir.

2.1 Proton ve Elektron Taşınımı Denklemleri

Metanol ve sudan oluşan sıvı karışım, yakıt pilinin yakıt kanalından beslenmektedir. Bu karışımın bir kısmı, karbon kumaşından oluşan anot destek tabakasının (ADT) içine doğru difüz etmektedir ve Pt ile Ru'dan oluşan anot katalizör tabaka-

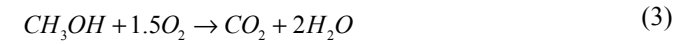
sına (AKT) ulaşmaktadır. Bu tabakada proton ve elektronlar oluşmaktadır. Denklem (1)'de AKT'da gerçekleşen reaksiyon gösterilmiştir.



AKT'de oluşan protonlar, Nafion®'dan yapılmış anot ve katot membranlarından (AM ve KM) ve seyreltik sülfürik asit solüsyonunun bulunduğu akan elektrolit kanalından (AEK) geçtikten sonra Pt'den oluşan katot, katalizör tabakasına (KKT) ulaşmaktadır. AKT'de oluşan elektronlar ise ADT'nin içinden difüz etmektedirler ve harici yük aracılığıyla katot destek tabakasından (KDT) geçip KKT'ye ulaşmaktadır. Protonlar ve elektronlar KKT'ye ulaştıklarında, hava kanalı aracılığıyla yakıt piline beslenen ve KDT'den geçen havanın içinde bulunan oksijenle reaksiyona girmektedirler. KKT'de gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyon Denklem (2)'de gösterilmiştir.



Membranlar ve AEK'den geçen metanol de KKT'ye ulaşmaktadır. Burada Denklem (3)'de gösterildiği gibi metanol oksijenle reaksiyona girmektedir.



Ohm Yasasına göre, farklı tabakalarda oluşan protonik ve elektronik akım yoğunlukları, Denklem (4) ve (5)'de sırasıyla gösterilmiştir.

$$i_l = -\sigma_l \frac{\partial \phi_l}{\partial x} \quad (\text{AKT, AM, AEK, KM ve KKT}) \quad (4)$$

$$i_s = -\sigma_s \frac{\partial \phi_s}{\partial x} \quad (\text{ADT, AKT, KKT ve KDT}) \quad (5)$$

ADT ve KDT'deki elektron iletimi için yük denklemi, Denklem (6)'da gösterilmiştir. AM, AEK ve KM'deki proton iletimi için yük denklemi, Denklem (7)'de gösterilmiştir.

$$\frac{\partial i_e}{\partial x} = 0 \quad (\text{ADT ve KDT}) \quad (6)$$

$$\frac{\partial i_l}{\partial x} = 0 \quad (\text{AM, AEK ve KM}) \quad (7)$$

AKT'daki proton ve elektron iletimi için yük denklemleri, Denklem (8) ve (9)'da sırasıyla gösterilmiştir. Proton ve elektronlar zıt yönlerde hareket ettikleri için, hacimsel akım yoğunluğu proton iletimi denkleminde kaynak terimi, elektron iletimi denkleminde ise kuyu terimi olarak gözükmektedir. Anottaki hacimsel yük yoğunluğu, Denklem (10)'daki gibi hesaplanabilir [18]. Anottaki polarizasyon, Denklem (11) kullanılarak bulunabilir.

$$\frac{\partial i_l}{\partial x} = j_a \quad (\text{AKT}) \quad (8)$$

$$\frac{\partial i_s}{\partial x} = -j_a \quad (\text{AKT}) \quad (9)$$

$$j_a = \frac{a_{oa}^{ref} C_{MeOH} \exp\left(\frac{\alpha_a F}{RT} \eta_a\right)}{C_{MeOH} + K_c \exp\left(\frac{\alpha_a F}{RT} \eta_a\right)} \quad (10)$$

$$\eta_a = \phi_s - \phi_l - E_a^{Eq} \quad (11)$$

KKT'deki proton ve elektron iletiminden kaynaklanan yük denklemleri, Denklem (12) ve (13)'te sırasıyla gösterilmiştir. Bu tabakada oluşan metanolun kimyasal oksitlenmesinden (Denklem 3) dolayı, katottaki hacimsel yük yoğunluğu, geçiş yük yoğunluğu denilen parazitik bir kayıp yüzünden, Denklem (14)'te gösterildiği gibi azalmaktadır. Bu yük yoğunluğunun değeri, Denklem (15)'te gösterildiği gibi KM ve KKT arayüzüne ulaşan ortalama molar akım hızı kullanarak bulunabilir. Denklem (16) kullanılarak katottaki polarizasyon bulunabilir.

$$\frac{\partial i_l}{\partial x} = -j_c \quad (\text{KKT}) \quad (12)$$

$$\frac{\partial i_s}{\partial x} = j_c \quad (\text{KKT}) \quad (13)$$

$$j_c + j_{sover} = a_{oc}^{ref} \frac{C_{O_2}}{C_{O_2}^{ref}} \exp\left(\frac{-\alpha_c F}{RT} \eta_c\right) \quad (14)$$

$$j_{sover} = \frac{6F\dot{N}_{MeOH}^{KM|KKT}}{t_{KKT}} \quad (15)$$

$$\eta_c = \phi_s - \phi_l - E_c^{Eq} \quad (16)$$

Elektron ve proton iletimi denklemlerini çözmek için uygulanan sınır koşulları, Denklem (17) ve (18)'de sırasıyla gösterilmiştir.

$$\phi_{s,YK|ADT} = 0 \quad (17)$$

$$\phi_{s,KDT|HK} = V_{cell} \quad (18)$$

2.2 Süreklilik ve Momentum Denklemleri

Destek ve katalizör tabakalarındaki süreklilik denklemi, Denklem (19)'da; bu denklemlerde kullanılan kaynak terimleri Denklem (20) ve (21)'de gösterilmiştir. Katalizör tabakasındaki toplam kütledeki artış veya azalış, protonların üretimi veya tüketiminden kaynaklanmaktadır. ADT, AKT, KDT ve KKT'deki akışkanların hızları, Denklem 22'de gösterildiği gibi Darcy Yasası kullanılarak bulunmaktadır. AM, AEK ve

KM'de ise, Şekil 1'de gösterilen x eksenini yöündeki akışkan hızı sıfır olarak varsayılmıştır [18].

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = S_u \quad (\text{ADT, AKT, KDT ve KKT}) \quad (19)$$

$$S_u = 0 \quad (\text{ADT ve KDT}) \quad (20)$$

$$S_u = \sum S_{c,k} MW_k \quad (\text{AKT ve KKT}) \quad (21)$$

$$u = -\frac{K}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (\text{ADT, AKT, KDT ve KKT}) \quad (22)$$

$$u = 0 \quad (\text{For AM, AEK ve KM}) \quad (23)$$

Denklemler (19)-(23)'ü çözmek için gerekli olan sınır koşulları, Denklem (24) ve (25)'te verilmiştir. Bu denklemlerdeki YK ve HK, sırasıyla yakıt kanalı ve hava kanalı temsil etmektedirler.

$$P_{YK|ADT} = P_{anot} \quad (24)$$

$$P_{HK|KDT} = P_{katot} \quad (25)$$

2.3 Türlerin Taşınımı Denklemleri

Metanol Taşınımı

ADT'deki metanolun taşınımında difüzyon ve konveksiyon mekanizmaları etkilidir. ADT'nin gözenekli yapısını göz önüne alarak, Denklem (26)-(28)'de gösterildiği gibi efektif difüzyon katsayısı kullanılmalıdır.

$$\dot{N}^* = -D_{eff} \frac{\partial C}{\partial x} + uC \quad (\text{ADT}) \quad (26)$$

$$-D_{eff} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + u \frac{\partial C}{\partial x} = 0 \quad (\text{ADT}) \quad (27)$$

$$D_{eff} = \epsilon^{1.5} D \quad (28)$$

Elektro-ozmoz etkisinden ötürü, AKT'de protonların üretimi metanolun membrana çekimine neden olur. Bu tabakadaki metanolun molar akım hızı Denklem (29)'da gösterilmiştir. Denklem (29) ve (8)'i kullanarak, taşınım denklemi, Denklem (30)'daki gibi gösterilebilir.

$$\dot{N}^* = -D_{eff} \frac{\partial C}{\partial x} + uC + n_a^{MeOH} \frac{i_l}{F} \quad (\text{AKT}) \quad (29)$$

$$-D_{eff} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + u \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{-j_a}{F} \left(\frac{1}{6} + n_a^{MeOH} \right) \quad (\text{AKT}) \quad (30)$$

Denklem (29) ve (30)'da gösterilen seyreltik metanolun çekim katsayısı, AKT ve AM arayüzündeki ortalama metanol ve su konsantrasyonları göz önüne alınarak, Denklem (31)'deki gibi hesaplanmıştır [18].

$$n_d^{MeOH} \cong n_d^{H_2O} \frac{C_{MeOH}}{C_{H_2O}} \Big|_{AKT|AM} \quad (31)$$

AM ve KM'de, Kısım 2.2'de açıklandığı gibi, konvektif akım ihmal edilmiştir. Bu yüzden, bu tabakalarda, Denklem (32) ve (33)'de gösterildiği gibi sadece elektro-ozmoz ve difüzyon mekanizmaları etkindir. Denklem (7) ve (32) kullanılarak, taşınım denklemi, Denklem (33)'deki gibi gösterilebilir.

$$\dot{N}'' = -D_{\text{eff}} \frac{\partial C}{\partial x} + n_d^{MeOH} \frac{i_l}{F} \quad (\text{AM ve KM}) \quad (32)$$

$$-D_{\text{eff}} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = 0 \quad (\text{AM ve KM}) \quad (33)$$

AEK'de, sülfürik asit solusyonunun konvektif akımının etkisi hesaba katılmalıdır. Çolpan vd.nin [6] yapmış olduğu çalışmaya benzer bir yaklaşımla, bu etki, metanol taşınım denkleminde kuyu terimi olarak ele alınmıştır. Denklem (34) ve (35)'de metanolun akım hızı ve metanol taşınım denklemleri, sırasıyla gösterilmiştir.

$$\dot{N}'' = -D_{\text{eff}} \frac{\partial C}{\partial x} + n_d^{MeOH} \frac{i_l}{F} \quad (\text{AEK}) \quad (34)$$

$$-D_{\text{eff}} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = -\frac{6V_{\text{fec}} C(x - x_{AM|FEC})(x_{FEC|CM} - x)}{n_{\text{repeat}} l_{\text{cell}} w_{\text{cell}} t_{\text{fec}}^3} \quad (\text{AEK}) \quad (35)$$

Su Taşınımı

ADT'deki su taşınımını belirten denklemler, metanol taşınımını gösteren denklemlere (Denklem (26) ve (27)) benzer şekilde yazılır. AKT için, difüzyon, konveksiyon ve elektro-ozmoz, su taşınımını Denklem (36)'da gösterildiği gibi etkilemektedir. Denklemler (8) ve (36)'yı kullanarak, taşınım denklemi, Denklem (37)'deki gibi gösterilebilir. AM, AEK ve KM'da suyun konsantrasyonunun sabit olduğu varsayılmıştır [6].

$$\dot{N}'' = -D_{\text{eff}} \frac{\partial C}{\partial x} + uC + n_d^{H_2O} \frac{i_l}{F} \quad (\text{AKT}) \quad (36)$$

$$-D_{\text{eff}} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + u \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{-j_a}{F} \left(\frac{1}{6} + n_d^{H_2O} \right) \quad (\text{AKT}) \quad (37)$$

Oksijen Taşınımı

HK ve KDT'deki oksijen taşınımını için ana denklemler, metanol taşınım denklemlerine (Denklem (26) ve (27)) benzerdir. KKT'de, metanol geçişi ve elektrokimyasal denklemden dolayı olan oksijen tüketimi, kuyu terimi olarak gösterilebilir. KKT'deki molar akım hızı ve taşınım denklemi, sırasıyla, Denklem (38) ve (39)'da gösterilmektedir.

$$\dot{N}'' = -D_{\text{eff}} \frac{\partial C}{\partial x} + uC \quad (\text{KKT}) \quad (38)$$

$$-D_{\text{eff}} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + u \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{-1}{4F} (j_c + j_{\text{sover}}) \quad (\text{KKT}) \quad (39)$$

Sınır Koşulları

YK girişindeki metanol konsantrasyonu, Denklem (40)'da gösterildiği gibi giriş parametresi olarak verilmektedir ve sabittir. YK girişindeki su ve HK girişindeki oksijen konsantrasyonları, giriş parametreleri kullanılarak hesaplanabilir. Yakıt tankı, sabit hacimde olup sadece metanol ve su bulundurduğundan suyun konsantrasyonu, Denklem (41)'de gösterildiği gibi, metanol konsantrasyonu cinsinden yazılabilir. HK girişindeki oksijen konsantrasyonu, havanın içindeki oksijenin molar oranı ve HK'daki giriş basıncı cinsinden, Denklem (42)'de gösterildiği gibi yazılabilir.

$$C_{MeOH}^{YK|ADT} = \text{Belirli} \quad (40)$$

$$C_{H_2O}^{YK|ADT} = \frac{\rho_{H_2O}}{MW_{H_2O}} \left(1 - \frac{C_{MeOH}^{YK, \text{giriş}} MW_{MeOH}}{\rho_{MeOH}} \right) \quad (41)$$

$$C_{O_2}^{HK|KDT} = x_{O_2} \frac{P_{hk, \text{giriş}}}{RT} \quad (42)$$

Anottan katoda geçen metanolun oksijenle girdiği kimyasal reaksiyon (Denklem (3)) sonucu, KKT'ye ulaşan metanolun tamamının, Denklem (43)'de gösterildiği üzere, KM ve KKT arayüzünde harcandığı varsayılmıştır [6].

$$C_{MeOH}^{CM|CCL} = 0 \quad (43)$$

Çıkış Parametreleri

Yakıt pilinin ortalama akım yoğunluğu, Denklem (44)'deki gibi hesaplanabilir.

$$i_{\text{pil}} = \int_{AKT} j_a dx \quad (44)$$

Yakıt pilinin güç yoğunluğu, Denklem (45)'teki gibi hesaplanabilir.

$$\dot{W}_{\text{pil}}'' = i_{\text{pil}} V_{\text{pil}} \quad (45)$$

3. SAYISAL ÇÖZÜM

İkinci kısımda verilen denklemlerin çözümleri ticari bir yazılım olan Comsol Multiphysics 4.2 kullanılarak yapılmıştır.

Bu çalışmada 1-boyutlu modelleme tekniği kullanıldığı için, yakıt pilinin geometrisi, Şekil 1'de gösterilen her tabaka için düz çizgiler çizilerek, çizgilerin uç uca eklenmesiyle oluşturulmuştur. Daha sonra, bu yazılımda önceden tanımlanmış denklemlerin ve sınır koşullarının bulunduğu ikincil akım dağılımı (Denklem (4)-(18)'i çözmek için), Darcy Yasası (Denklem (19)-(25)'i çözmek için) ve seyreltik türlerin transportu (Denklem (26)-(43)'ü çözmek için) isimli modül kullanılarak ve çıkış parametreleri (Denklem (44) ve (45)) değişken olarak tanımlanarak, yakıt pilinin ikinci kısımda gösterilen denklemleri yazılıma girilmiştir. Bu yazılımda bir modülde kullanılan bir değişkeni, başka bir modülde kullanarak, farklı transport denklemleri birbiriyle birleştirilmektedir. Örneğin, Denklem (10)'da gösterilen anottaki hacimsel yük yoğunluğu denklemindeki metanol konsantrasyonu terimi ve Denklem (30)'da gösterilen metanol taşınım denklemindeki metanol konsantrasyonu terimi için yazılımda aynı sembolü kullanarak bu iki denklem farklı modüllerde tanımlanmasına rağmen birleştirilebilmektedir. Bu şekilde bir yakıt pili çoklu-fizik modeli oluşturulmuştur. Seçilen geometrinin ağ yapısı için genel fizik modundaki en ince yapı seçilmiş ve ayrıca katalizör tabakaları için ilave bir inceltme yapılmıştır. Sonlu eleman metodu yöntemi kullanan bu yazılımın çözücüsünün bağıl toleransı 0.001 olarak alınmıştır. Parametrik çalışmaların sonuçları da bu yazılımı kullanarak elde edilmiştir.

4. TARTIŞMA

Bu kısımda, modelin doğrulanması ve yakıt, hava ve akan elektrolit kanalı girişlerindeki akışkan hızlarının etkilerini içeren parametrik çalışmaların sonuçları tartışılmıştır. Simülasyonlarda kullanılan ana giriş verileri Tablo 1'de gösterilmiştir.

4.1 Modelin Doğrulanması

Üçüncü kısımda açıklanan modelleme tekniği kullanılarak DMYP için bir model geliştirilmiş ve modelin sonuçları, Ge ve Liu [19] tarafından yapılan deneysel çalışmanın sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Deneysinde, ürettikleri DMYP'nin performansını, akım yoğunluğu, anot ve katot akış hızı, sıcaklık, basınç ve katot nemlendirme sıcaklığı kontrol etme becerisine sahip ticari bir yakıt pili test istasyonu kullanarak yaptıkları ölçümlerle değerlendirmişlerdir. Ürettikleri DMYP'de şu malzemeler kullanılmıştır: İki adet son plaka için 316 paslanmaz çelik, iki adet kıvrımlı tasarımı çift kutuplu plakalar için grafit, membran için Nafion® 117, anot ve katot destek tabakası için karbon kumaşı, anot katalizör tabakası için 3 mg cm⁻² yüklü Pt-Ru, katot katalizör tabakası için 3 mg cm⁻² yüklü Pt-siyah. Hem deneysinde hem de bu çalışmada kullanılan yakıt pilinin geometrik boyutları ve ana giriş parametreleri Tablo 1'de verilmiştir. Ayrıca oluşturulan

modelde varsayıldığı gibi, deney boyunca yakıt pilinin sıcaklığı sabit tutulmuştur.

Deneysel verilerle modelin simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması 0.2 V ve 0.9 V pil voltajları arasında yapılmıştır ve sonuçlar Şekil 3'te gösterilmiştir. Bu şekilde görüldüğü üzere, deneysel ve modelleme verileri arasında iyi bir uyum vardır. Düşük akım yoğunluklarındaki küçük farklılık, Denklem (10) ve (14)'te gösterilen basitleştirilmiş elektrokimyasal denklemlere bağlanabilir. Ayrıca, 2. kısımda belirtildiği üzere, bu çalışmada tek fazlı bir modelleme yapılarak, CO₂ kabarcıkları ve su buharı oluşumu ihmal edilmiştir. Çolpan vd. [6]'da belirtildiği üzere, bu gazların oluşumu özellikle sınır akımı yoğunluğunu etkiler. Dolayısıyla yüksek akım yoğunluğu veya düşük pil voltajı çalışma şartlarında iki fazlı modelleme tekniği daha önem kazanmaktadır. Örneğin, eğer 0.2 V'tan daha düşük bir pil voltajı için akım yoğunluğu hesaplanırsa, o zaman deneysel verilerle modelin sonuçları arasındaki farkın daha da artması beklenirdi. Fakat çalışılan pil voltajı aralığı için tek fazlı modelin sonuçlarının, deneysel verilerle arasındaki farkın kabul edilebilir olduğu görülmektedir.

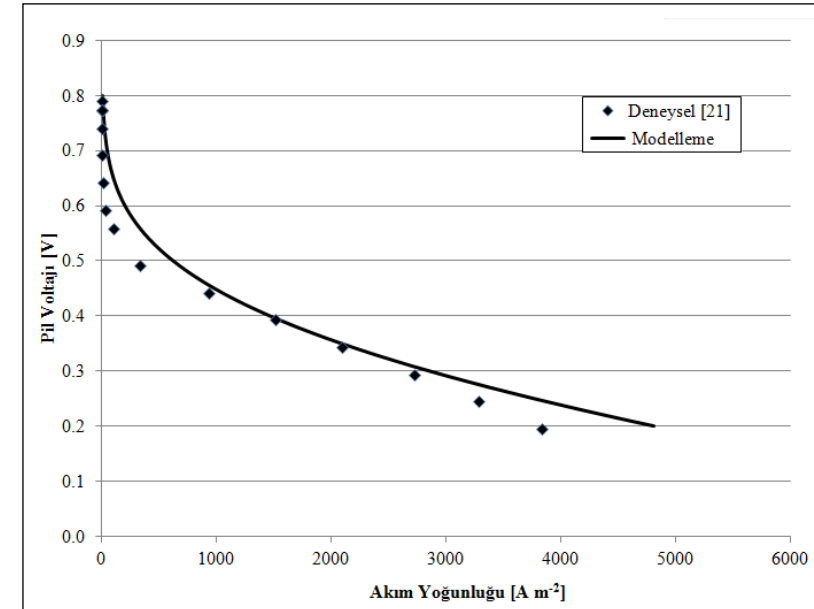
4.2 Anot ve Katot Membranların Kalınlığının Etkisi

Anot ve katot membranları AE-DMYP'nin işleyişinde, iyonların iletiminde ve katalizör tabakalarını, akan elektrolit kanalından ayırmakta önemli bir rol üstlenmektedirler. Bu membranların yapımında genel olarak Nafion® kullanılmaktadır. Bu malzeme göreceli olarak dayanıklı ve yüksek iyonik iletkenliğe ve kimyasal dayanıklılığa sahiptir [28]. Bu avantajlarına karşı, bu membranlar metanol geçirgenliğine izin verirler ve katottaki karışık potansiyel diye tabir edilen olgu ve yakıtın boşa harcanması dolayısıyla, pil voltajı, güç yoğunluğu ve elektrik veriminde düşüklüğe neden olurlar. Nafion® membranları kalınlıklarına göre sınıflandırılır. Örneğin, Nafion® 1135, Nafion® 115 ve Nafion® 117'nin kalınlıkları sırasıyla 0.89×10⁻⁴ m, 1.27×10⁻⁴ m ve 1.83×10⁻⁴ m'dir.

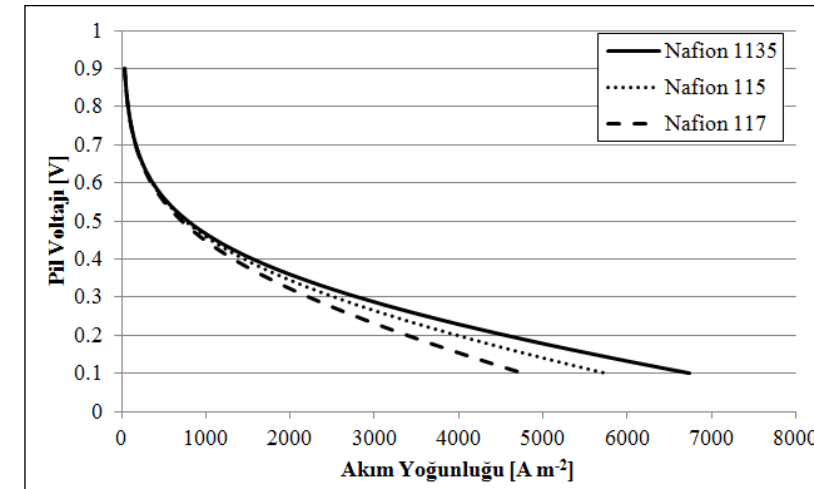
DMYP'de, membran kalınlığını arttırmak, membranlardaki Ohmik polarizasyonu arttırmaktadır; fakat aynı zamanda metanol geçiş hızını azaltacakları için, katottaki aktivasyon polarizasyonu azaltmaktadır. Membran kalınlıklarının AE-DMYP'nin pil voltajına ve güç yoğunluğuna etkisi çalışılıp, sonuçlar Şekil 4 ve 5'te gösterilmiştir. Sonuçlara göre, membran kalınlıkları düşük olduğunda AE-DMYP'nin performansında iyileşme görülmektedir. İnce membranlar için, Ohmik kayıplardaki düşüşün, katodik aktivasyon kayıplarındaki artıştan daha yüksek olduğu sonucu çıkarılabilir. Örneğin, yakıt pilinin voltajı 0.3 V alındığında, Nafion® 1135, Nafion® 115 ve Nafion®117 için güç yoğunlukları, sırasıyla, 839 W m⁻², 756 W m⁻² ve 665 W m⁻² olarak bulunmuştur.

Tablo 1. Giriş Parametreleri

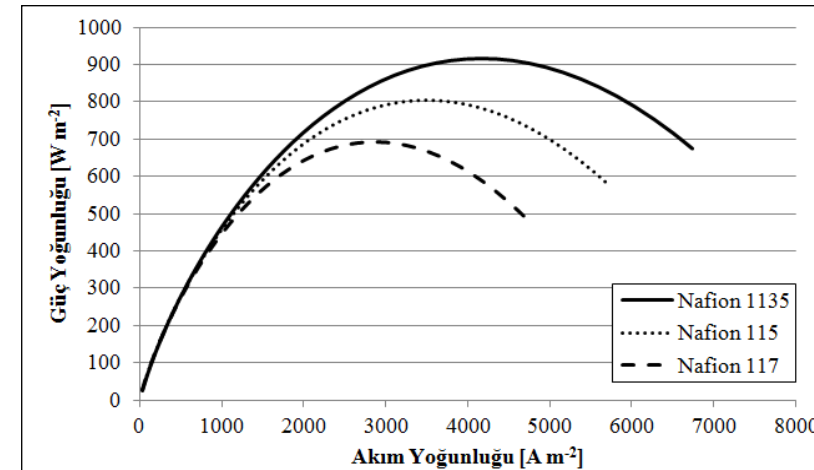
Giriş Parametresi	Değer
Yakıt pilinin uzunluğu	6.5×10^{-2} m
Yakıt pilinin tekrar elemanının genişliği	2×10^{-3} m
Anot ve katot destek tabakalarının kalınlığı	1.4×10^{-4} m
Anot ve katot katalizör tabakalarının kalınlığı	3×10^{-5} m
Anot ve katot membranlarının kalınlığı	8.9×10^{-5} m
Akan elektrolit kanalının kalınlığı	5×10^{-4} m
Tek bir yakıt pilinde bulunan tekrar elemanlarının sayısı	32
Yakıt kanalı girişindeki metanolün konsantrasyonu	2000 mol m^{-3}
Hava kanalı girişindeki oksijenin molar oranı	21%
Tek bir yakıt pilindeki akan elektrolitin hacimsel akış hızı	$1.67 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
Yakıt pilinin sıcaklığı	70 °C
Anot ve katot çıkışlarındaki basınç	1 atm
Anot ve katot destek tabakalarının gözenekliliği	0.6 [7]
Anot ve katot katalizör tabakalarının gözenekliliği	0.4 [7]
Anot ve katot membranlarının gözenekliliği	0.28 [7]
Akan elektrolit kanalındaki ara parçanın gözenekliliği	0.6 [16]
Anot ve katot destek tabakalarının geçirgenliği	$2 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ [20]
Anot ve katot katalizör tabakalarının geçirgenliği	10^{-13} m^2 [20]
Akan elektrolit kanalının geçirgenliği	$2 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ [16]
Metanolün sudaki difüzyonunun katsayısı	$2.8 \times 10^{-9} \times e^{\left[2436 \left(\frac{1}{353} - \frac{1}{T}\right)\right]}$ $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$ [21]
Metanolün Nafion®'daki difüzyonunun katsayısı	$4.9 \times 10^{-10} \times e^{\left[2436 \left(\frac{1}{333} - \frac{1}{T}\right)\right]}$ $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$ [21]
Oksijenin gazdaki difüzyonunun katsayısı	$\left(\frac{T^{1.75} \times 5.8 \times 10^{-8}}{27.772 \times P_c}\right)$ $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$ [22]
Suyun elektro-ozmotik çekim katsayısı	(T is in °C) [23]
Membranın protonik iletkenliği	10 S m^{-1} [24]
Sülfürik asit solusyonunun protonik iletkenliği	145 S m^{-1} [25]
Destek tabakasının elektronik iletkenliği	300 S m^{-1} [26]
Metanol oksitlenme reaksiyonu sabiti	$2.265 \times 10^{-3} \text{ mol m}^{-3}$ [27]
Referans oksijen konsantrasyonu	0.472 mol m^{-3} [7]
Anodik transfer katsayısı	0.5 [7]
Katodik transfer katsayısı	0.5 [7]
Anottaki referans akım yoğunluğu değişimi ile spesifik alanın çarpımı	10^6 A m^{-3} [7]
Katottaki referans akım yoğunluğu değişimi ile spesifik alanın çarpımı	200 A m^{-3} [7]



Şekil 3. Modelin Doğrulanması



Şekil 4. Membran Kalınlığının AE-DMYP'nin Voltajına Etkisi

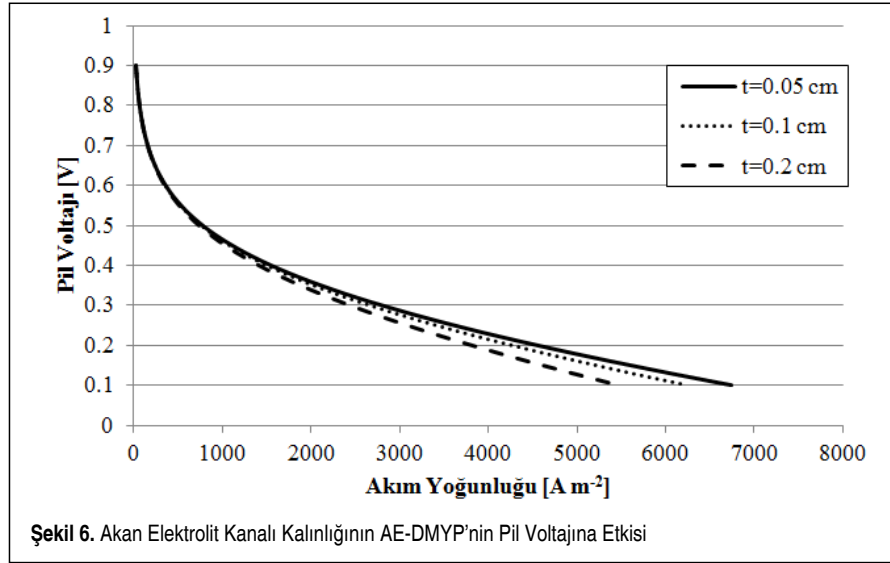


Şekil 5. Membran Kalınlığının AE-DMYP'nin Güç Yoğunluğuna Etkisi

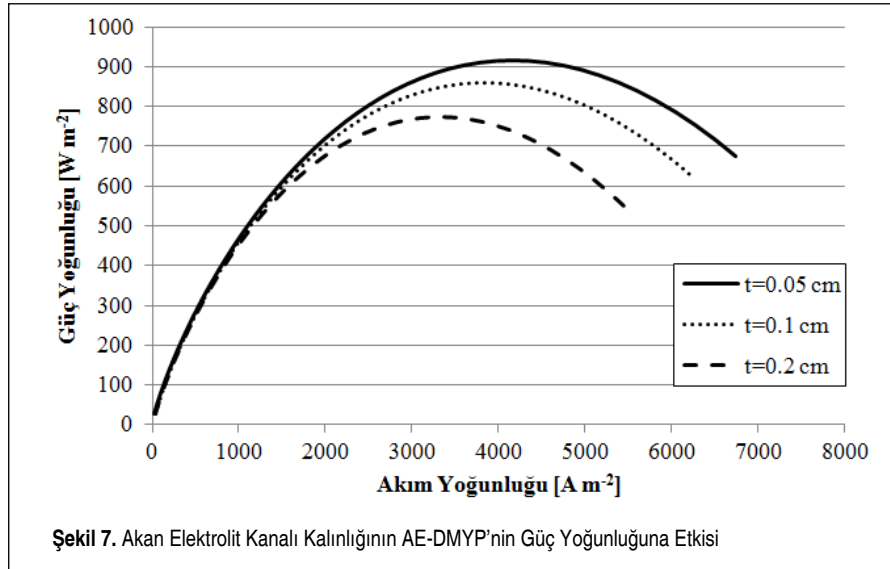
4.3 Akan Elektrolit Kanalının Kalınlığının Etkisi

Akan elektrolit kanalının kalınlığının seçimi, AE-DMYP için bir diğer önemli tasarım kriteridir. Bu kalınlığın AE-DMYP üzerine olan etkisi Tablo 1'de verilen giriş parametreleri için çalışılmıştır. Yazarın önceki bir çalışmasında [6], yeteri kadar yüksek hızda akan elektrolitle işleyen, AE-DMYP için elektrolit kalınlığının değişiminin özellikle Ohmik polarizasyonu etkilediği gösterilmiştir. Kontak rezistanslarını ve dış döngüdeki elektron akımından dolayı olan kayıpları ihmal ettiğimizde, bu polarizasyon özellikle protonların anot membranı, akan elektrolit kanalı ve katot membranının içinden geçişinden dolayı gerçekleşir. Sadece AEK kalınlığını değiştirdiğimiz zaman, AE-DMYP'deki toplam Ohmik polarizasyondaki değişim, sadece bu kanal-daki polarizasyondaki değişimden dolayıdır. Bunun yanında sülfürik asit iletkenliği, sıcaklık ve sülfürik asit konsantrasyonu önemli şekilde değişir. Bu gerçek göz önüne alınarak verilen sıcaklıkta en yüksek iletkenliği veren sülfürik asit konsantrasyonu seçilmiştir (%36 ağırlık oranında ve 80 °C'deki sülfürik asit iletkenliği 145 S/m^2 [25]). Diğer yandan, önceki bir çalışmada [6], alınabilecek en düşük AEK kalınlığının $5 \times 10^{-4} \text{ m}$ olduğu gösterilmiştir. Şu an kullanılan malzemelerle daha düşük bir kalınlıkta kanal seçmenin yakıt pilinin aşınmasına ve bozulmasına neden olduğu belirtilmiştir.

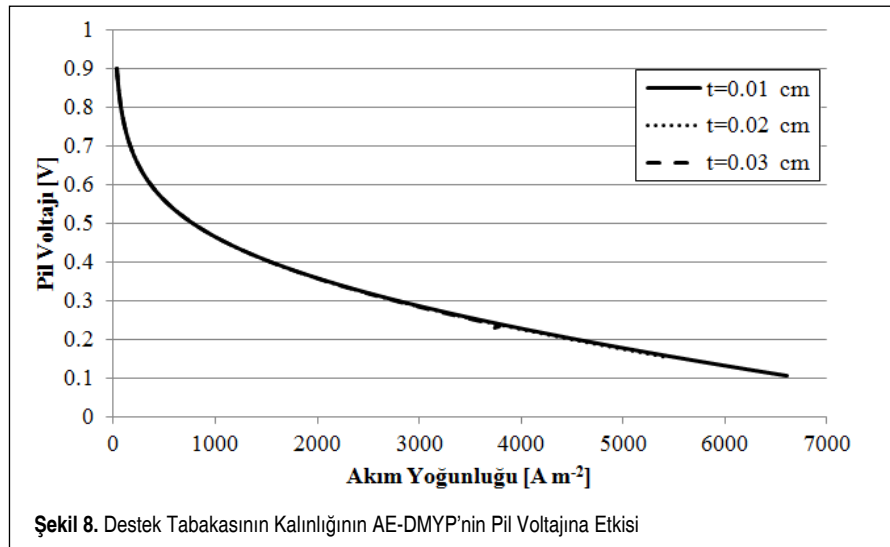
AEK kalınlığının, AE-DMYP'nin pil voltajı ve güç yoğunluğuna olan etkisi, sırasıyla, Şekil 6 ve 7'de gösterilmiştir. Sonuçlar bu kanal kalınlığının mümkün olan en düşük boyutta alınması gerektiğini göstermiştir. Elektrolit kanalının kalınlığı arttıkça Ohmik polarizasyon artacağı için, yakıt pilinin performansı da bu durumda azalır. Örneğin, yakıt pili voltajını 0.3 V aldığımız zaman, $5 \times 10^{-4} \text{ m}$, $1 \times 10^{-3} \text{ m}$ ve $2 \times 10^{-3} \text{ m}$ AEK kalınlıkları için, güç yoğunlukları, sırasıyla, 839 W m^{-2} , 799 W m^{-2} ve 732 W m^{-2} olarak bulunmuştur. Bu verilere ilaveten, tek bir yakıt pilinin toplam kalınlığı, elektrolit kalınlığı arttırıldığında artacağı için, yakıt pili sisteminin hacimsel güç yoğunluğunun azaldığı da göz önüne alınmalıdır.



Şekil 6. Akan Elektrolit Kanalı Kalınlığının AE-DMYP'nin Pil Voltajına Etkisi



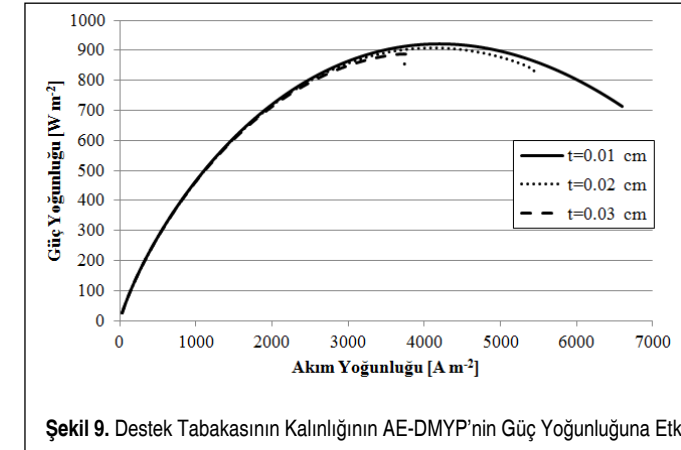
Şekil 7. Akan Elektrolit Kanalı Kalınlığının AE-DMYP'nin Güç Yoğunluğuna Etkisi



Şekil 8. Destek Tabakasının Kalınlığının AE-DMYP'nin Pil Voltajına Etkisi

4.4 Anot ve Katot Destek Tabakalarının Kalınlığının Etkisi

DMYP'lerde, destek tabakaları reaktantların akışını yakıt ve hava kanallarından katalizör tabakalarına sağlayan gözenekli yapılarıdır. Bu tabakalardan ayrıca elektronlar geçiş yaptığı için yüksek elektronik iletkenliğe sahip malzemeler seçilir. Bu tabakalar için en çok kullanılan malzeme karbon kağıdı veya karbon kumaşdır. Destek tabakası kalınlığındaki bir artışın iki temel sonucu vardır. Birincisi, bu tabakadan geçen elektronların yol uzunluğunu arttırdığı için Ohmik kayıplar artar. İkincisi, sınır akımı yoğunluğu (AKT ve AM arayüzündeki metanol konsantrasyonunun ve metanol geçiş hızının sıfır olduğunda elde edilen maksimum akım yoğunluğu) düşer. Destek tabakası kalınlığının yakıt pili voltajına ve güç yoğunluğuna etkisi, sırasıyla, Şekil 8 ve 9'da görülebilir. Bu şekillerden görülebileceği üzere, daha ince tabakalar, Ohmik kayıpları düşürdüğü için, daha yüksek güç yoğunluğunun vermektedirler. İlave olarak, sınır akımı yoğunluğu ince tabakalar için daha yüksek olduğu görülmektedir ki, yakıt pilinin daha yüksek akımlarda çalışabilmesine imkan sağlayabildiği anlamına gelmektedir. Diğer taraftan, destek tabakasının çok ince olması, kanal kırımlarının varlığından ötürü oluşan düzensiz metanol dağılımına neden olur ki yakıt pili voltajının da bu yüzden ciddi miktarda düşeceği hesaba katılmalıdır [29]. Yapılan simülasyonlar sonucu, 1×10^{-4} m, 2×10^{-4} m ve 3×10^{-4} m destek tabakası kalınlığı için sınır akımı yoğunluğu, sırasıyla, 6604 A m^{-2} , 5445 A m^{-2} ve 3746 A m^{-2} olarak bulunmuştur. Bu kalınlıklar için üretilebilecek maksimum güç yoğunluğu da, sırasıyla, 920.1 W m^{-2} , 907.1 W m^{-2} ve 888.5 W m^{-2} , olarak hesaplanmıştır.



Şekil 9. Destek Tabakasının Kalınlığının AE-DMYP'nin Güç Yoğunluğuna Etkisi

5. SONUÇLAR

AE-DMYP'nin performansının çeşitli giriş parametrelerine göre değişimini incelemek için bir çoklu fizik modeli geliştirilmiştir. Bu parametreler membranların, destek tabakalarının ve akan elektrolit kanalının kalınlıklarıdır. Bu modeli kullanarak, yakıt pilinin voltajı ve güç yoğunluğu hesaplanmıştır. Bu çalışmanın ana bulguları aşağıda listelenmiştir.

- Modelin sonuçları ve deneysel veriler arasında iyi bir uyum olduğu bulunmuştur.
- Membranların kalınlıkları azaldıkça, AE-DMYP'nin performansında artış görülmüştür.
- Akan elektrolit kanalı kalınlığı mümkün olduğunca düşük alınmalıdır.
- Daha ince destek tabakaları daha iyi performans verirler; fakat düzensiz metanol dağılımı probleminin neden olabilecekleri de göz önünde bulundurulmalıdır.
- Membranların, destek tabakalarının ve akan elektrolit kanalının kalınlıkları, sırasıyla, 0.89×10^{-4} m, 1×10^{-4} m, 5×10^{-4} m alındığında, güç yoğunluğunun en yüksek değeri 920.1 W m^{-2} olarak bulunmuştur.

Bu çalışmada, AE-DMYP'nin performansını arttırmak için bazı giriş parametreleri önerilmiştir. Yapılan simülasyonlarının sonuçlarının ve ana bulgularının, taşınabilir uygulamalarda kullanılacak AE-DMYP'nin geliştirilmesine yardımcı olacağı beklenmektedir. İleride yapılacak bir çalışmada, çoklu-boyut ve çoklu-faz etkileri göz önüne alınarak daha iyi bir model geliştirilecektir.

TEŞEKKÜR

Şekil 2'de gösterilen AE-DMYP fotoğrafını sağlayarak yaptıkları katkı için Kanada'nın Ottawa şehrinde bulunan Carleton Üniversitesinden David Ouellette, Dr. Edgar Matida ve Dr. Cynthia Cruickshank'e teşekkür ederim.

SEMBOLLER

a_i	Akım yoğunluğu değişimi ile spesifik alanın çarpımı, A m^{-3}
C	Konsantrasyon, mole m^{-3}
D	Difüzyon katsayısı, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
E^{Eq}	Denge voltajı, V
F	Faraday sabiti, s A mole^{-1}
i	Akım yoğunluğu, A m^{-2}
j	Hacimsel akım yoğunluğu, A m^{-3}
j_{sover}	Geçiş akım yoğunluğu, A m^{-3}
K_c	Metanol oksitlenme reaksiyonu sabiti, mol m^{-3}
l	Uzunluk, m
MW	Moleküler ağırlık, g mole^{-1}
n_d	Elektro-ozmotik çekim katsayısı
n_{repeat}	Tekrar elemanlarının sayısı
N''	Kesit alanı başına düşen molar akım hızı, $\text{mole m}^{-2} \text{s}^{-1}$
P	Basınç, N m^{-2}
R	Evrensel gaz sabiti, $\text{J K}^{-1} \text{mole}^{-1}$
S_c	Türlerin korunumu denklemindeki kaynak terimi, $\text{mole m}^{-3} \text{s}^{-1}$
S_u	Sürekli denklemindeki kaynak terimi, N m^{-3}
t	Kalınlık, m
T	Yakıt pili sıcaklığı, K
u	Akışkanın hızı, m s^{-1}
V_{pil}	Yakıt pili voltajı, V
\dot{V}	Akım hızı, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
x	uzaklık, m; molar oran
w	Genişlik, m
\dot{W}_{pil}''	Yakıt pilinin güç yoğunluğu, W m^{-2}

Yunan harfleri

α	Transfer katsayısı
ε	Gözeneklilik
ρ	Yoğunluk, g m^{-3}
σ	İletkenlik, S m^{-1}
K	Geçirgenlik, m^2
μ	Dinamik viskozite, $\text{N m}^{-2} \text{s}$
η	Polarizasyon, V
ϕ	Potansiyel, V

Alt simgeler

a	Anot
ac	Hava kanalı
c	Katot
eff	Efektif
fc	Yakıt kanalı
fec	Akışkan elektrolit kanalı
in	Giriş
l	Elektrolit fazı
$MeOH$	Metanol

s Elektrot fazı
xover Geçiş

Üst simgeler

in Giriş

ref Referans

KAYNAKÇA

1. **Çolpan, C.Ö., Dinçer, I., Hamdullahpur, F.** 2008. "Portable Fuel Cells – Fundamentals, Technologies and Applications," p. 87-101. Mini-Micro Fuel Cells: Fundamentals and Applications, Editors: Kakac, S., Pramuanjaroenkij, A., Vasiliev, L., NATO Science for Peace and Security Series, Springer, Netherlands.X
2. **Wang, C.Y.** 2008. "Principles of Direct Methanol Fuel Cells for Portable and Micro Power," p. 235-242. Mini-Micro Fuel Cells: Fundamentals and Applications, Editors: Kakac, S., Pramuanjaroenkij, A., Vasiliev, L., NATO Science for Peace and Security Series, Springer, Netherlands.
3. **Kordesch, K., Cifrain, M., Hejze, T., Hacker, V., Bachhiesl, U.** 2000. "Fuel Cells with Circulating Electrolytes," Proceedings of the Fuel Cell Seminar 2000/30 October-2 November 2000, p. 432-435, Portland, OR, USA.
4. **Kordesch, K., Hacker, V.** 2000. "Fuel Cells with Circulating Electrolyte and Their Advantages for DMFCs," Proceedings of the 17th International Electric Vehicle Symposium & Exhibition/October 15-18, 2000, Montreal, QC, Canada.
5. **Kordesch, K., Hacker, V., Bachhiesl, U.** 2001. "Direct Methanol-air Fuel Cells with Membranes plus Circulating Electrolyte," Journal of Power Sources, vol. 96, p. 200-203.
6. **Çolpan, C.Ö., Cruickshank, C.A., Matida, E., Hamdullahpur, F.** 2011. "1D Modeling of a Flowing Electrolyte-direct Methanol Fuel Cell," Journal of Power Sources, vol. 196, p. 3572-3582.
7. **Ge, J., Liu, H.** 2006. "A Three-dimensional Mathematical Model for Liquid-fed Direct Methanol Fuel Cells," Journal of Power Sources, vol. 160, p. 413-421.
8. **Liu, W., Wang, C.Y.** 2007. "Three-dimensional Simulations of Liquid Feed Direct Methanol Fuel Cells," Journal of the Electrochemical Society, vol. 154, no. 3, p. B352-B361.
9. **Yang, W.W., Zhao, T.S.** 2007. "A Two-dimensional, Two-phase Mass Transport Model for Liquid-feed DMFCs," Electrochimica Acta, vol. 52, p. 6125-6140.
10. **Ge, J., Liu, H.** 2007. "A Three-dimensional Two-phase Flow Model for a Liquid-fed Direct Methanol Fuel Cell," Journal of Power Sources, vol. 163, p. 907-915.
11. **Murgia, G., Pisani, L., Shukla, A.K., Scott, K.** 2003. "A Numerical Model of a Liquid-feed Solid Polymer Electrolyte DMFC and its Experimental Validation," Journal of the Electrochemical Society, vol. 150, no. 9, p. A1231-A1245.
12. **Liu, W., Wang, C-Y.** 2007. "Modeling Water Transport in Liquid Feed Direct Methanol Fuel Cells," Journal of Power Sources, vol. 164, p. 189-195.
13. **Liu, F., Lu, G., Wang, C-Y.** 2006. "Low Crossover of Methanol and Water Through Thin Membranes in Direct Methanol Fuel Cells," Journal of the Electrochemical Society, vol. 153, no. 3, p. A543-A553.
14. **Kjeang, E., Goldak, J., Golriz, M.R., Gu, J., James, D., Kordesch, K.** 2005. "Modeling Methanol Crossover by Diffusion and Electro-osmosis in a Flowing Electrolyte Direct Methanol Fuel Cell," Fuel Cells, vol. 4, p. 486-498.
15. **Kjeang, E., Goldak, J., Golriz, M.R., Gu, J., James, D., Kordesch, K.** 2006. "A Parametric Study of Methanol Crossover in a Flowing Electrolyte-direct Methanol Fuel Cell," Journal of Power Sources, vol. 153, p. 89-99.
16. **Çolpan, C.Ö., Fung, A., Hamdullahpur, F.** "2D Modeling of a Flowing Electrolyte-direct Methanol Fuel Cell," Journal of Power Sources, vol. 196, p. 301-311.
17. **Ouellette, D., Çolpan, C.Ö., Matida, E., Cruickshank, C.A.** 2011. "Modeling of Carbon Dioxide Formation in Flowing Electrolyte-direct Methanol Fuel Cells," Proceedings of the ASME 2011 9th Fuel Cell Science, Engineering and Technology Conference (FuelCell2011), August 7-10, 2011, Washington, DC, USA.
18. **Wang, C.Y.** 2008. "Computational Modeling of Two-phase Transport in Portable and Micro Fuel Cells," p. 243-256. Mini-Micro Fuel Cells: Fundamentals and Applications, Editors: Kakac, S., Pramuanjaroenkij, A., Vasiliev, L. NATO Science for Peace and Security Series, Springer, Netherlands.
19. **Ge, J., Liu, H.** 2005. "Experimental Studies of a Direct Methanol Fuel Cell," Journal of Power Sources, vol. 142, p. 56-69.
20. **Jung, S.H.** 2010. "Modeling and Control of Two-phase Flow in Direct Methanol Fuel Cells," A Dissertation in Mechanical Engineering, The Pennsylvania State University.
21. **Scott, K., Taama, W., Cruickshank, J.** 1997. "Performance and Modelling of a Direct Methanol Solid Polymer Electrolyte Fuel Cell," Journal of Power Sources, vol. 65, p. 159-171.
22. **Oliveira, V.B., Falcao, D.S., Rangel, C.M., Pinto, A.M.F.R.** 2008. "Heat and Mass Transfer Effects in a Direct Methanol Fuel Cell: A 1D model," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 33, p. 3818-3828.
23. **Lu, G., Wang, C.Y.** 2005. Two-phase Microfluidics, Heat and Mass Transport in Direct Methanol Fuel Cells, p. 317-350. Transport Phenomena in Fuel Cells, Editors: B. Sundén, M. Faghri, WIT Press, USA.
24. "DuPont Fuel Cells," http://www2.dupont.com/FuelCells/en_US/products/literature.html , son erişim tarihi: 12 Aralık 2012.
25. **Darling, H.E.** 1964. "Conductivity of Sulfuric Acid Solutions," Journal of Chemical and Engineering Data, vol. 9, no. 3, p. 421-426.
26. **Liu, W., Wang, C-Y.** 2007. "Electron Transport in Direct Methanol Fuel Cells," Journal of Power Sources, vol. 164, p. 561-566.
27. **Meyers, J.P., Newman, J.** 2002. "Simulation of the Direct Methanol Fuel Cell II. Modeling and Data Analysis of Transport and Kinetic Phenomena," Journal of the Electrochemical Society, vol. 149, no. 6, p. A718-A728.
28. **Neburchilov, V., Martin, J., Wang, H., Zhang, J.** 2007. "A Review of Polymer Electrolyte Membranes for Direct Methanol Fuel Cells," Journal of Power Sources, vol. 169, p. 221-238.
29. **Xu, C., Zhao, T.S., Ye, Q.** 2006. "Effect of Anode Backing Layer on the Cell Performance of a Direct Methanol Fuel Cell," Electrochimica Acta, vol 51, p. 5524-5531.