



YÜKSEK SICAKLIK PROTON DEĞİŞİM MEMBRAN YAKIT HÜCRESİ MİKRO-KOJENERASYON UYGULAMASININ DENEYSEL VE TEORİK İNCELENMESİ

Yılser DEVRİM * ve Ekin ÖZGİRGİN YAPICI**

*Atılım Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü

06836, İncek, Ankara, yilser.devrin@atilim.edu.tr

**Çankaya Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü
06790, Etimesgut, Ankara, ekinozgirgin@cankaya.edu.tr

(Geliş Tarihi: 16.03.2017, Kabul Tarihi: 20.03.2018)

Özet: Bu çalışmada, yüksek verimlilikleri ve çevre dostu teknolojiler olmaları sebebiyle tercih edilen, güvenilir güç üretim tekniklerinden biri olan yüksek sıcaklık proton değişim membran (YSPEM) yakıt hücreleri kullanılarak bir evsel mikro-kojenerasyon (birlikte ısı-güç) sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan sistem, YSPEM yakıt hücresi tarafından üretilen elektrik gücü ve faydalı ısının kombine bir şekilde, kullanılmasını içermektedir. Hücresinin çalışması sırasında, yüksek performans ve kararlı güç üretimi sağlanabilmesi için hücre içerisinde üretilen ısının uzaklaştırılması ve hücre içi sıcaklığın sabit kalması gerekmektedir. Bu sebeple tasarlanan yenilikçi soğutma sisteminin atık ısı, sıcak su ısıtmasında kullanılacak olan ısı enerjisinin teminini sağlamaktadır. Böylelikle toplam verim basit çevrimlere göre yaklaşık iki katına çıkabilmektedir. Çalışma kapsamında tasarlanan 225 W gücünde YSPEM yığını 160°C çalışma sıcaklığında hidrojen ve hava gazları ile test edilmiştir. Çalışması sırasında sıcaklığın hücre içerisinde homojen olarak dağılımı, hücresinin kısa sürede gerekli çalışma sıcaklığına ulaşabilmesi, yakıt hücresinde oluşan ısının hücresinden sürekli olarak uzaklaştırılabilmesi için yakıt hücresi yığını soğutucu akışkan (Isı Transfer Yağı 32-Petrol Ofisi) kullanılarak soğutulmuştur. Hücre izolasyonu malzemesi seçimi ve kalınlığı, doğal taşınım ve radyasyon yolu ile ısı kaybı hesabıyla belirlenmiştir. Maksimum verim çalışma koşulları için mikro-kojenerasyon sisteminin su giriş çıkış sıcaklıkları, su ve soğutucu akışkan debileri, uygun boru çapı hesabı ve pompa güç hesabı yapılarak nihai sistem tasarlanmıştır. Çalışmada tasarlanan kojenerasyon sisteminde, YSPEM yığınının soğutulması ile açığa çıkan atık ısı, 15-20°C'lik şebeke suyunun ısıtılması için kullanılmıştır. Şebeke suyu sıcaklığı yalıtımlı hücre kullanılması durumunda ortalama 50°C'ye kadar ısıtılmıştır. Elde edilen veriler yakıt hücresi mikro-kojenerasyon uygulamasının kullanılabilirliğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: YSPEM, Yakıt hücresi, Polibenzimidazol membran, Mikro-kojenerasyon

EXPERIMENTAL STUDY AND THEORETICAL INVESTIGATION OF HIGH TEMPERATURE PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL MICRO-COGENERATION APPLICATION

Abstract: In this study, a house hold micro-cogeneration system is designed using high temperature proton exchange membrane (HTPEM) fuel cell. HTPEM type fuel cells gain the highest interest lately, due to their advantages in terms of increasing efficiency and power quality, reducing harmful emissions and flexibility of operation with respect to the other fuels. The micro-cogeneration system involves producing both electrical energy and hot water and/or vapor together in an economical way, utilizing single fuel (HTPEM fuel cells) for household applications. During the operation of the fuel cell, for high efficiency and stable power production, the access heat of the stack should be removed constantly and the temperature of the stack should be held stable. Heat recovered from the designed innovative cooling system is used for acquiring energy for heating water. This way, thermal efficiency is almost doubled compared to simple cycle. In the scope of this study, 225 W HTPEM fuel cell stack is designed and tested at 160°C operation temperature with hydrogen gas and air. During operation, for homogenous distribution of temperature among the cells, for a short start up period leading to a fast required steady state temperature and for constantly removing the access heat produced in the cell, the cell stack is cooled by using a cooling fluid (Heat Transfer Oil 32- Petrol Ofisi). Selection of insulation material type and thickness for the cell stack is done using natural convection and radiation loss calculations. For the most efficient operating conditions, micro-cogeneration system water inlet and exit temperatures, water and cooling fluid flow rates, convenient pipe diameter and pump power calculations are done to finalize the design. With the cogeneration system designed during the studies, by recovering the access heat of the insulated HTPEM cell stack, district water with initial temperature of 15-20 °C is heated around 50 °C. Data gathered during studies indicate that fuel cell micro-cogeneration application is highly viable.

Keywords: HTPEM, Fuel cell, Polybenzimidazole membrane, Micro-cogeneration

SEMBOLLER VE KISALTMALAR:

\dot{m}_c	Soğutucu akışkanın kütle debisi (kg/s)
\dot{m}_{su}	Kullanım suyu kütle debisi(kg/s)
$C_{p,c}$	Soğutucu akışkanın özgül ısı değeri (kJ/kgK)
$C_{p,su}$	Kullanım suyunun özgül ısı değeri (kJ/kgK)
$\dot{Q}_{hücre}$	Yakıt hücresi yığınının ısı gücü (kW)
ρ	Yoğunluk (m ³ /kg)
η	Termal verim
T	Sıcaklık (K)
P_{pump}	Pompa gücü (W)
η_{pump}	Pompa verimi
ΔT_{lm}	Logaritmik ortalama sıcaklık farkı (°C)
ΔT	Sıcaklık farkı (°C)
U	Toplam ısı aktarım katsayısı (W/m ² °C)
A_s	Isı transferi yüzey alanı (m ²)
$\dot{Q}_{kayıp}$	Doğal taşınım ve radyasyon ile hücrenin kaybettiği ısı miktarı (W)
T_s	Hücrenin yüzey sıcaklığı (K)
T_o	Ortam sıcaklığı (K)
$R_{ısıl}$	Toplam ısı direnci (°C / W)
R_k	Taşınım ısı direnci (°C / W)
h	Taşınım katsayısı (W/m ² K)
R_R	Radyasyon ısı direnci (°C / W)
F	Şekil faktörü
σ	Stefan–Boltzman sabiti (W/ m ² K ⁴)
Nu_L	Nusselt Sayısı (hL/k)
Ra_L	Rayleigh Sayısı ($g\beta(T_s-T_o)L^3/\nu\alpha$)
Re	Reynold Sayısı ($\rho V D_H/\mu$)
Pr	Prandtl Sayısı (ν/α)
α	Isıl yayılım değeri (m ² /s)
ν	Viskozite (m ² /s)
k	Isıl iletim katsayısı (W/mK)
I	Akım yoğunluğu (A/cm ²)
F	Faraday sabiti (96,485 colomb/elektron-mol)
S_{H_2}	Hidrojen stokiyometrisi
S_{O_2}	Oksijen stokiyometrisi
$n_{hücre}$	Hücre sayısı

GİRİŞ

Dünyamızda günden güne artan enerji ihtiyacı ile paralel olarak azalan konvansiyonel enerji kaynakları yeni enerji kaynakları arayışını gerekli kılmıştır. Temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı geleceğimiz için zorunlu hale gelmiştir. Alternatif bir yakıttan istenen temel karakteristikler özetle; yüksek ısı değeri, zehirli olmama, çevreyle uyumlu olma, farklı enerji dönüştürücülerinde kullanılabilme ve ekonomik olması olarak ifade edilebilir. Bu bakımdan hidrojen yakıtı önemli niteliklere sahip ve sınırsız olarak tanımlanabilecek bir alternatiftir (Lin vd, 2014). Hidrojen,

enerji yoğunluğu yüksek, karbon esaslı yakıtlara alternatif ve yenilenebilir kaynaklarından elde edilen çevre dostu bir yakıttır. Hidrojenin yakıt olarak kullanıldığı sistemler yakıt hücreleridir. Yakıt hücresi türleri arasında PEM yakıt hücreleri yüksek verimlilikleri ve modüler yapıda olmaları nedeniyle en fazla üzerinde çalışma yapılan yakıt hücresi türüdür. PEM yakıt hücreleri özellikle sabit uygulamalar, günlük kullanım ve ulaşım için günden güne daha fazla önem kazanmaktadır. Son yıllarda yüksek verimlilikleri ve hücreden atılan ısının değerlendirilmesi amacıyla PEM yakıt hücrelerinin kojenerasyon uygulamaları da gündeme gelmiş ve çalışmalar başlamıştır (Gandiglio vd, 2014).

Kojenerasyon; ‘bileşik ısı-güç sistemleri’ (CHP), enerjinin hem elektrik hem de ısı biçimlerinde aynı sistemden, eş zamanlı olarak beraberce üretilmesidir. Bu birliktelik, iki enerji biçiminin tek başlarına ayrı yerlerde üretilmesinden daha ekonomik sonuçlar vermektedir. Kojenerasyon sistemleri, güç ve ısının kombine bir şekilde üretilmesini içerir ve basit çevrimde atık olacak ısı geri kazanılarak ticari ve endüstriyel uygulamalarda kullanılabilir. Ülkemizde, genellikle ısı gereksinimi yerel olarak kurulan bir ısıtma sisteminden karşılanırken, elektrik enerjisi ise bir dağıtım şebekesinden sağlanır. Teorik olarak, kojenerasyon sisteminde gaz türbini veya gaz/dizel motoru belirli bir miktar elektrik üretmek üzere elektrik jeneratörünü döndürürken, türbin veya motorun egzoz gazları veya motor soğutma suyu vasıtasıyla ürettiği önemli miktarda faydalı atık ısının, atık ısı kazanı veya ısı eşanjörleri kullanılarak buhar, sıcak su veya sıcak havaya dönüşümü sağlanır. Böylelikle kojenerasyon tesisleri sadece yakıt girdisi kullanarak çok yüksek ısı verim ile hem elektrik, hem de buhar, sıcak su veya sıcak hava formunda ısı üretirler. Basit çevrimde çalışan, yani sadece elektrik üreten bir gaz türbini ya da motoru kullandığı enerjinin sadece % 30-40 kadarını elektrığe çevirebilir. Bu sistemin kojenerasyon şeklinde kullanılması halinde ise sistemden dışarıya atılacak olan ısı enerjisinin büyük bir bölümü de kullanılabilir enerjiye dönüştürülerek toplam enerji girişinin % 70-90 arasında değerlendirilmesi sağlanabilir.

Elektrik enerjisine dayalı, kurulu gücü 50 kW ve altı olan, ısı ile elektrik enerjisinin aynı cihazla tek seferde üretilmesine olanak sağlayan sisteme mikro-kojenerasyon denilir (Kuhn vd, 2008). Mikro-kojenerasyon sistemlerinde doğal gaz, biyo yakıt, etanol vb. yakıtlar kullanılmaktadır (Santangelo vd, 2007). Son yıllarda yüksek verimlilikleri ve çalışmalarını sırasında ısı üretmeleri sebebiyle yakıt hücrelerinin kojenerasyon uygulamaları çok büyük önem kazanmıştır. Türkiye’de elektrik iletim hatlarındaki kayıplar % 3, dağıtım hatlarındaki kayıplar ise % 9’dur. Mikro-kojenerasyon sistemi ile elektrik iletim ve dağıtım hatlarındaki kayıpların önüne geçilmektedir. Elektrik üretim veriminin ortalama % 35 olduğu konvansiyonel sistemlerde geriye kalan % 65’lik enerji, atık ısı olarak dışarı atılır. Mikro-kojenerasyon sistemi ile elektrik üretimi yaklaşık % 35 verim ile gerçekleştirilebilirken % 65’lik atık ısı, önemli ölçüde ısınma ve sıcak su ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla kullanılabilir. Ülkemizde henüz üzerinde çok

fazla çalışılmayan bu konu, özellikle Avrupa ülkelerinde büyük derecede teşvik görmektedir.

Yakıt hücre teknolojisi hem elektrik üretimi hem de kojenerasyon uygulamaları için uygun potansiyele ve performans avantajlarına sahip gelişmekte olan çevre dostu bir teknolojidir. PEM yakıt hücreleri modüler olmaları, yüksek verimlilik ve daha düşük sıcaklıklarda çalışmaları nedeniyle diğer yakıt hücrelerine göre üzerinde daha fazla çalışılan yakıt hücresi türüdür. PEM yakıt hücrelerinin otomotiv ve kojenerasyon uygulamalarında küçük boyutta uygulanabilirlikleri, diğer yakıt hücresi türlerine göre daha düşük sıcaklıklarda çalışmaları, çalışma sıcaklıklarından kolayca yüksek güç üretimine geçebilmeleri ve sessiz olmaları vb. önemli avantajları bulunmaktadır (Barbir, 2012). Bunların yanında, yüksek verimde çalışmaları, % 40-50 seviyesinde maksimum teorik voltaj üretebilmeleri ve güç ihtiyacındaki değişikliklere hızlı cevap verebilmeleri de PEM yakıt hücrelerini tercih edilir konuma getirmektedir (Arsalis vd, 2011).

PEM yakıt hücrelerinde çalışma sırasında açığa çıkan ısı soğutma sıvısı veya hava soğutma sistemi kullanılarak uzaklaştırılmaktadır. Yakıt hücresi temelli mikro-kojenerasyon sistemleri yüksek verimlilik sağlayabilmeleri nedeniyle oldukça ilgi çekmektedir. PEM yakıt hücrelerinde açığa çıkan atık ısıdan faydalanılarak ısıtma ve sıcak su temini sağlanabilmektedir. Böylece % 85-90'lara varan verim elde edilmektedir (Arsalis vd, 2012; Özgirgin vd, 2015). Ayrıca bu sistemler şebekeye bağlanabildiğine elektrik ihtiyacını karşılamada da kullanılabilirler. Yakıt hücreli mikro-kojenerasyon sistemleri ile kayıpların önemli ölçüde bertaraf edilmesi ile birincil enerji kaynakları çok daha verimli kullanılabilirler.

Binalarda mikro-kojenerasyon uygulaması için gerekli minimum sıcaklık aralığı 40-80°C'dir ve mikro-kojenerasyon sistemlerinde ısıtmada kullanılacak sıvı çıkış sıcaklığı 100°C civarında olması bu ihtiyacı karşılamaktadır. Özellikle yüksek sıcaklık PEM yakıt hücrelerinde soğutma sıvısının yakıt hücresinden çıkış sıcaklığı ~100°C olduğu için gerekli ısının sağlanması 60-70°C'de çalışan yakıt hücrelerine göre daha kolay olmaktadır (Campanari vd, 2014). Kojenerasyon uygulamalarında yüksek ısı aktarımı ve verim için, 160-200°C sıcaklık aralığında çalışması gerektiğinden, bu sıcaklık aralığında çalışan en başarılı membranlar fosforik asit yüklemesi yapılmış polibenzimidazol ve türevleridir. Literatüre bakıldığında yüksek sıcaklık çalışmaları için gelecek vaat eden ve yüksek performans gösteren yapıların fosforik asit emdirilmiş PBI bazlı membranlar olduğu ve son yıllarda büyük ilgi çektiği görülmektedir (Ergun vd, 2014; Chandan vd, 2013).

PEM yakıt hücrelerinde etkin bir soğutma sistemi sağlanması kojenerasyon uygulamalarının verimliliği açısından önemlidir. 160-200°C sıcaklık aralığı gibi sıcaklıklarda çalışan PEM yakıt hücrelerinde etkin bir soğutma için üç farklı soğutma sistemi yaklaşımı uygulanmaktadır. Bunlar sırasıyla su soğutma, hava

soğutma ve yağlı soğutmadır. Havanın ve suyun düşük özgül ısı değerinden dolayı yağlı soğutma ile karşılaştırıldıklarında verimlilikleri biraz daha düşüktür (Zhang, vd. 2016).

Bu çalışmada, temiz, güvenilir ve sağlam güç üretim tekniklerinden biri olan, yüksek verimlilikleri ve çevre dostu teknolojiler olmaları nedeniyle tercih PEM yakıt hücreleri kullanılarak bir mikro-kojenerasyon sistemi tasarlanmıştır. Çalışmada, yüksek sıcaklık PEM yakıt hücresinin mikro-kojenerasyon uygulaması deneysel olarak incelenmiştir. Farklı gazlarla çalışma özelliğinin yüksek olması (doğal gaz, biyogaz, metanol vb.) ve yüksek çalışma sıcaklığı nedeniyle fosforik asit emdirilmiş polibenzimidazol membran temelli PEM yakıt hücresi kullanılmıştır.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

YSPEM Yakıt Hücresi Mikro-Kojenerasyon Sistem Tasarımı

PEM yakıt hücrelerinde hidrojen gazı hücrenin anot tarafına, oksijen gazı veya hava ise katot tarafına beslenir. Eşitlik 1'de yakıt hücresi toplam hücre reaksiyonu verilmiştir. Sistemde gerekli olan hidrojen ve oksijen gazı miktarları Eşitlik 2 ve 3 kullanılarak belirlenmiştir:



$$N_{H_2, \text{giriş}} = S_{H_2, \text{giriş}} \frac{1}{2F} n_{\text{hücre}} \quad (2)$$

$$N_{O_2, \text{giriş}} = S_{O_2, \text{giriş}} \frac{1}{4F} n_{\text{hücre}} \quad (3)$$

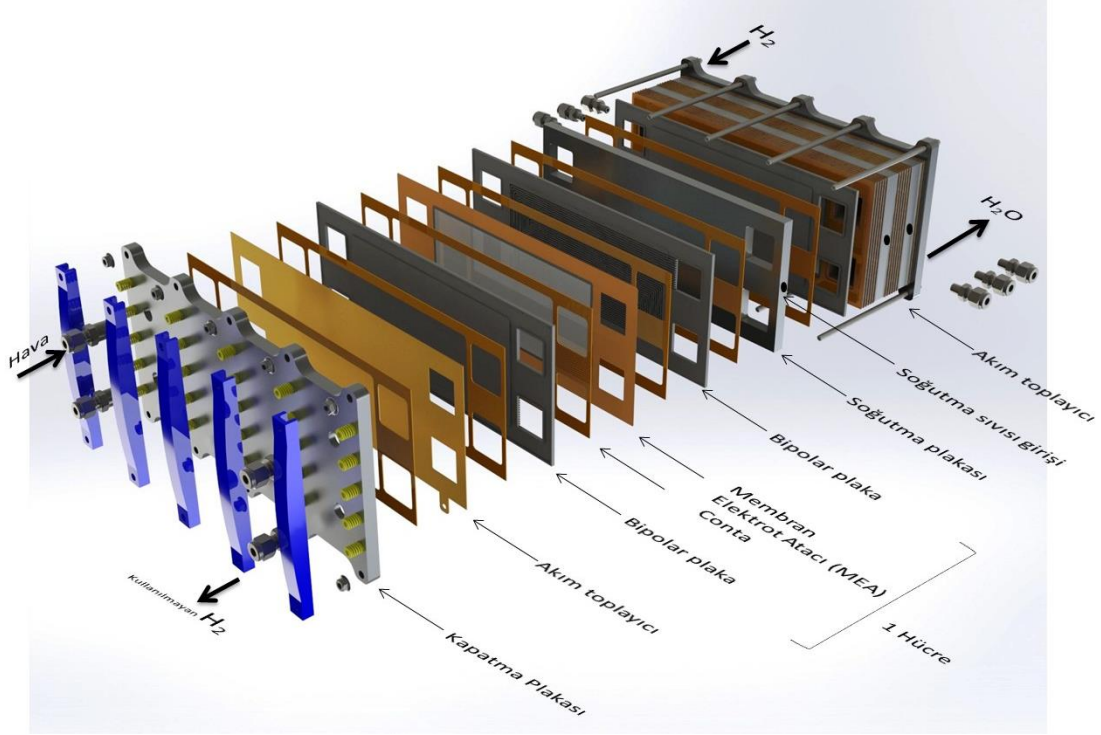
Burada I akım yoğunluğu (A/cm^2), F Faraday sabiti, S_{H_2} ve S_{O_2} sırasıyla hidrojen ve oksijen gazları gazı stokiometrilere ve $n_{\text{hücre}}$ YSPEM yığımında kullanılan hücre sayısıdır.

Yakıt hücresinde üretilen ısı miktarı Eşitlik 3 kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\sum \dot{E}_g - \sum \dot{E}_c + \dot{Q} - \dot{W}_{net} = 0 \quad (4)$$

Eşitlik 4 te \dot{Q} , YSPEM yakıt hücresinde üretilen ısı, \dot{W}_{net} yakıt hücresi yığımından elde edilen elektriksel güçtür. \dot{E}_g ve \dot{E}_c sırasıyla yakıt hücresine giren ve çıkan reaktantların entalpileridir.

Çalışmada PBI membran temelli YSPEM yakıt hücresi yığını kullanılmıştır. Tasarımı yapılan YSPEM yakıt hücresinin 3 boyutlu çizimi ve genel özellikleri Şekil 1'de ve Tablo 1'de sırasıyla verilmiştir. Bipolar plakalar kompozit grafitten imal edilmiştir. Bipolar plaka üretimden sonra yüksek sıcaklık çalışmalarına uygun dayanımlı viton conta ve altın kaplama akım toplayıcıların kullanıldığı YSPEM yakıt hücresi birleştirilmiştir. Bağlantılarda paslanmaz çelik bağlantı elemanları kullanılmıştır.



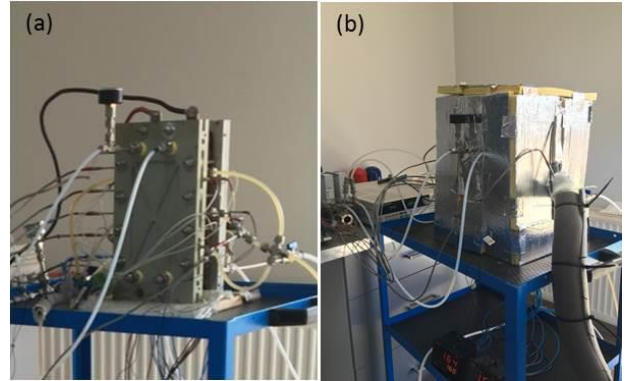
Şekil 1. Yüksek sıcaklık PEM yakıt hücresi yığını

Tablo 1. YSPEM yakıt hücresi yığınının tasarım parametreleri

Parametre	Değer
Maksimum Net Güç	225 W
Akım Yoğunluğu (0.6 V' da)	0.3 A/cm ²
Membran	H ₃ PO ₄ yüklü PBI
Aktif Yakıt Hücresi Alanı	150 cm ²
Hücre Sayısı	6
H ₂ tüketimi	4 slpm
Hava tüketimi	15slpm
Reaktant gaz nem oranı	0
Maksimum güçte ısı yayılımı	250 W
Çalışma sıcaklığı	160°C

YSPEM yakıt hücresi soğutma sistemi olarak soğutma akışkanı hücre içinde dolaşmaktadır. Çalışmada yakıt hücresinde reaksiyon sonucunda açığa çıkan ısıyı uzaklaştırmak için hücreler arasından geçen, elektriksel olarak yalıtkan ısı transfer yağı kullanılmıştır.

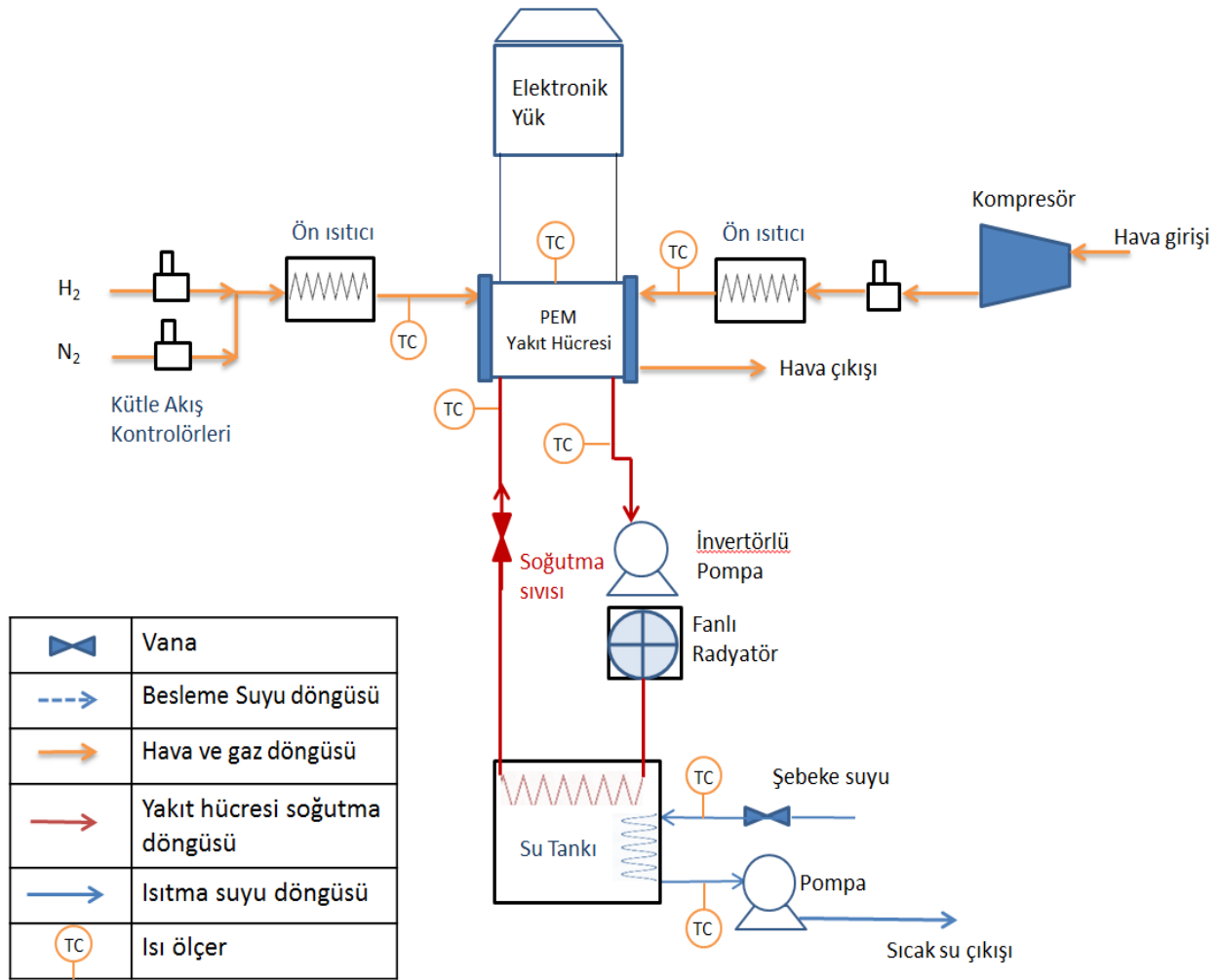
Şekil 2'de çalışmada kullanılan PEM yakıt hücresinin yalıtım yapılmadan önceki ve yalıtım yapıldıktan sonraki durumu gösterilmiştir. Hücrede üretilen atık ısının soğutucu akışkana daha iyi iletilmesini sağlamak ve çevreye ısı kayıplarını önlemek için PEM yakıt hücresi yığını yapılan hesaplamalar doğrultusunda 1 cm kalınlığında cam yünü ile yalıtılmıştır.



Şekil 2. Yüksek Sıcaklık a) yalıtımsız b) yalıtımlı PEM yakıt hücresi yığını

Şekil 3'de PEM yakıt hücresi yığını ve soğutma (mikrokojenerasyon) sistemi gösterilmektedir. PEM yakıt hücresi yığınının açığa çıkan ısıyı uzaklaştırmak ve hücrelerde sabit bir çalışma sıcaklığını korumak için ortalama c_p değeri 2.4 kJ/kg°C (130°C'de), yoğunluğu 840 kg/m³, viskozite değeri 0.00262 Pa (N s)/m² olan soğutucu akışkan, bir invertörlü (değişken devirli) pompa yardımı ile hücreler arasından geçirilmektedir.

YSPEM yakıt hücresi yığınının çalışma gücü ve sıcaklığına göre soğutma sıvısı debisi ayarlanabilmekte, fazla ısınması ya da sıcaklığın çalışma sıcaklığının altına düşmesi gibi durumlarda pompa kendiliğinden devreye girip çıkabilmektedir. Ayrıca ısının üretiminin istenilen sınırlar üzerinde olması, yani hücre sıcaklıklarının çok yükselmesi durumunda sistem şemasında görülen fan devreye girerek ek bir soğutma sağlamaktadır. Değişken devirli pompa eş zamanlı olarak yakıt hücresi yığını soğuturken şebekeden gelen soğuk suyu ısıtmaktadır.



Şekil 3. YSPEM Yakıt Hücresi Mikro-Kojenerasyon Sistemi

Deneysel Çalışmalar

150 cm² aktif alanlı ve yüksek sıcaklıkta çalışan PEM yakıt yığını testleri PEM yakıt hücresi test sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yakıt hücresinden gerekli gücün çekilmesi ve polarizasyon eğrisinin çizilmesi için programlanabilir elektronik yük kullanılmıştır. Yüksek sıcaklık yakıt hücresi testleri Hidrojen ve hava gazları kullanılarak (stokiyometri: 1.2/2.5) 160°C’de gerçekleştirilmiştir. Testlerde başlangıç çalıştırma yöntemi olarak; elektriksel kısa devre olup olmadığı kontrol edildikten sonra gaz kaçak testi yapılmıştır. “DOE PEM yakıt pilleri pil bileşenleri için hızlandırılmış zorlama test protokolü” ne göre pildeki kaçak testi yapılmıştır (USFCC Document Number 04-070). Yakıt hücresi testlerinde gazlar sisteme verilmeden önce hücre sıcaklıkları 120°C’ye ısıtılmış ve sistemden anot tarafından kuru hidrojen, katot tarafından ise hava geçirilmiştir (Devrim, vd, 2016). Daha sonra minimum 100 mA/cm² olacak şekilde sistemden akım çekilmiştir. Başlangıç prosedürü bitiminden sonra performans testlerine devam edilmiştir.

Sistem Analizi

Sistemin termodinamik hesaplamaları sırasında yapılan kabulleri şöyle sıralayabiliriz:

- Yüksek Sıcaklık PEM Yakıt Hücresi Mikro-Kojenerasyon Sistemi sürekli akış (zamana bağlı olmayan) durumda çalışmaktadır.
- PEM yakıt hücresine beslenen reaktant gazlar için ideal gaz kanunları geçerlidir.
- Tek boyutlu akış kabulü yapılmıştır.
- Kinetik ve potansiyel enerji değişimleri iç enerji ve entalpi değişimleri yanında göz ardı edilebilecek kadar küçüktür.
- Yakıt hücresinden doğal taşınım ve radyasyon yolu ile olan ısı kaybı tek boyutlu olarak hesaplanmıştır.

Soğutma Sistemi Hesaplamaları

Soğutucu akışkan ve kojenerasyon ile ısıtılan su için kullanılan enerji denklemleri Eşitlik 5 ve 6’da verilmiştir (Özgirgin vd, 2016; Rohsenow vd, 1998).

$$\dot{m}_c \cdot c_{p,c} \cdot (T_{çıkış,c} - T_{dönüş,c}) = \dot{Q}_{hücre} \quad (5)$$

$$\dot{m}_{su} \cdot c_{p,su} \cdot (T_{şebeke,su} - T_{çıkış,su}) = \dot{Q}_{hücre} \times \eta \quad (6)$$

\dot{m}_c ve \dot{m}_{su} sırasıyla hücrede kullanılan soğutucu akışkan ve kojenerasyon ile ısıtılan kullanım suyunun debileri, $c_{p,c}$ ve $c_{p,su}$ sırasıyla hücrede kullanılan soğutucu akışkan ve kojenerasyon ile ısıtılan su için sabit basınçta ortalama sıcaklıklarda hesaplanmış özgül ısı değerleri, $T_{çıkış,c}$ ve $T_{dönüş,c}$ sırasıyla soğutucu akışkanın hücreden çıkış ve hücreye dönüş sıcaklıkları için kullanılmıştır. η sistemdeki ısı kaybı göz alındığında belirlenen termal verimdir. Sistemde kullanılması gereken uygun boru çapı hesabı ve pompa güç hesabı eşitlik 7 ve 8 kullanılarak yapılmıştır.

$$d = \sqrt{\frac{4\dot{m}_{çıkış,su}}{\rho \cdot V \cdot \pi}} \quad (7)$$

$$P_{pompa} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta_{pompa}} \quad (8)$$

Kullanılacak pompanın seçimi, akmaya karşı direnci suya göre oldukça yüksek olan soğutucu akışkanın devir daimini sağlayabilecek şekilde yapılmıştır.

Son olarak hücre yığını içerisinde kılcal soğutma kanallarından oluşan sistemin zorlanmış taşınımlı iç akış analizleri, aşağıdaki denklemler kullanılarak yapılmış ve $(U \cdot A)$ değeri farklı hücre sıcaklıkları için hesaplanmıştır.

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T_{lm} \quad (9)$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{\left[\frac{\Delta T_o - \Delta T_i}{\ln \left(\frac{\Delta T_o}{\Delta T_i} \right)} \right]}{\quad} \quad (10)$$

Bu denklemde $\Delta T_o = T_{giriş,c} - T_{şebeke,su}$ ve $\Delta T_i = T_{dönüş,c} - T_{çıkış,su}$ olarak hesaplanmaktadır. Sıcaklıkların ölçüldüğü noktalar yaklaşık olarak Şekil 3 de görülebilir.

Doğal Taşınım ve Radyasyon ile Isı kaybı Hesabı

Yakıt Hücresi çalışması sırasında yüksek sıcaklıkta olduğundan doğal taşınım ve radyasyon ile çevreye ısı kaybeder. Bu ısının miktarı ne kadar az olursa sistem için o kadar avantajlı bir durum söz konusudur. Hücrenin doğal taşınım ve radyasyon ile kaybedeceği ısı hesaplaması Eşitlik 5 kullanılarak yapılmıştır [Barbir, 2012]. Yakıt hücresinde üretilen ısının etkin bir kojenerasyon sistemi için tamamen soğutucu akışkana geçmesi gerekmektedir. Bu nedenle bahsedildiği üzere sistemde oluşabilecek doğal taşınım ve radyasyon ile ısı kayıplarını minimize etmek gerekmektedir.

$$\dot{Q}_{kayıp} = \frac{(T_s - T_o)}{R_{ısıl}} \quad (11)$$

$\dot{Q}_{kayıp}$, doğal taşınım ve radyasyon ile hücrenin kaybettiği ısı miktarını, T_s ve T_o da sırası ile hücrenin yüzey sıcaklığı ve ortam sıcaklığını göstermektedir. $R_{ısıl}$, ısıl direnç aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$R_{ısıl} = \frac{1}{\left[\frac{1}{R_K} + \frac{1}{R_R} \right]} \quad (12)$$

R_K doğal taşınım ısıl direnci ve R_R ise radyasyon ısıl direncidir ve aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$R_K = \frac{1}{h \cdot A_s} \quad (13)$$

$$R_R = \frac{1}{\sigma \cdot F \cdot A_s (T_s + T_o) (T_s^2 - T_o^2)} \quad (14)$$

Yukarıdaki denklemde σ Stefan-Boltzman sabiti (5.67×10^{-8}), F şekil faktörü, (ilk kabul için 1 olarak alınabilir) ve A_s hücre yüzey alanıdır (m^2). Taşınım ısıl direncinin hesaplanabilmesi için taşınım katsayısının (h) hesaplanması gerekmektedir (Eşitlik 15).

$$h = \frac{k}{L} Nu_L \quad (15)$$

Hücredeki toplam ısı kaybı modellenirken, Nusselt sayısı doğal taşınım için yatay ve dikey plakalar üzerinde sırasıyla Eşitlik 16 ve 17 kullanılarak belirlenmiştir.

Dikey plaka Nusselt Sayısı hesabı:

$$Nu_L = \left[0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0.5}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right]^2 \quad (16)$$

Yatay plaka Nusselt sayısı hesabı:

$$Nu_L = 0.54 \cdot Ra_L^{1/4} \quad (17)$$

Prandtl Sayısı ortalama değeri 0.9 iken, Rayleigh sayısı hesabı Eşitlik 18'de görülebilir.

$$Ra_L = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_o) \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha} \quad (18)$$

Yukarıdaki denklemde Havanın ortalama sıcaklıkta ısıl iletim katsayısı (k_{hava}) 0.03 W/mK, ısıl yayılım değeri (α_{hava}) 0.00003 m^2/s , viskozitesi (ν_{hava}) ise 0.000021 m^2/s 'dir. Denklemde L , plaka alanı/plaka çevresi olarak hesaplanmaktadır.

Hücre Isıl İzolasyonu Hesaplamaları

Yakıt hücresi yığınının ürettiği ısının soğutucu akışkana geçmesi ve doğal taşınım ve radyasyonla ısı kaybının engellenmesi için yığında kullanılması gereken ısıl yalıtım malzemesi kalınlığı ($L_{yalıtım}$), malzeme cinsi ve ısıl iletkenlik değeri belirlendikten sonra, Eşitlik 19 ile hesaplanmaktadır. Dikey yüzeylerdeki kaybın yatay yüzeylerden daha fazla olduğu belirlenmiştir.

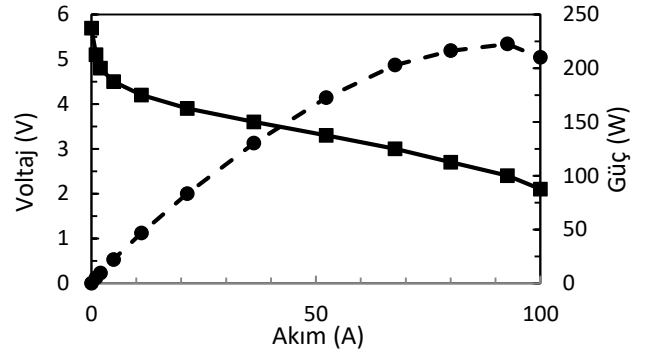
$$L_{yalıtım} = \frac{k \cdot (T_s - T_o) \cdot A_s}{\dot{Q}_{kayıp}} \quad (19)$$

BULGULAR VE TARTIŞMA

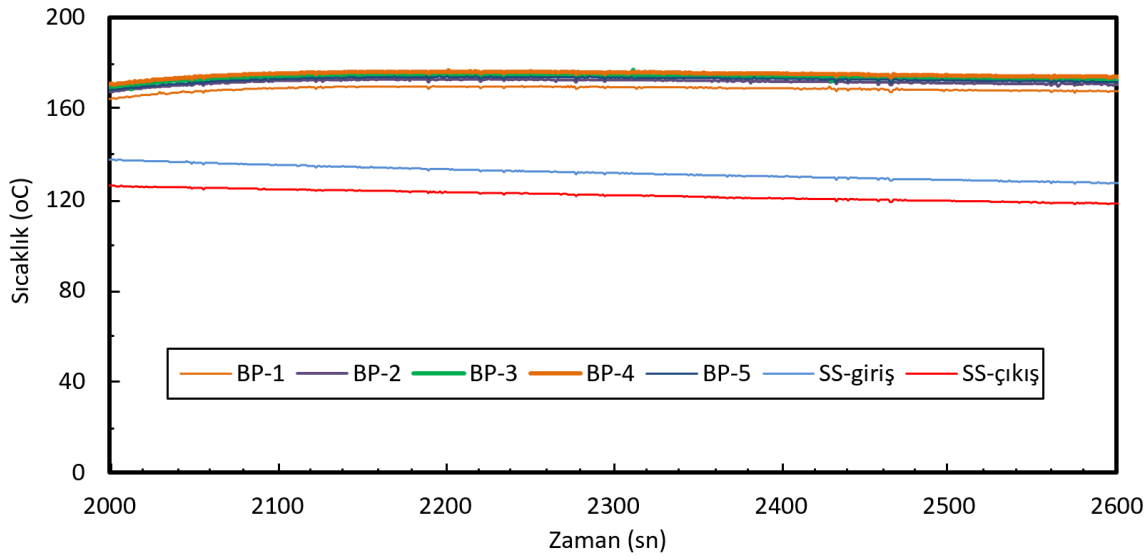
PEM Yakıt Hücresi Çalışmaları

6 hücreli yüksek sıcaklık PEM yakıt hücresi çalışması sırasında sıcaklığın hücre içerisinde homojen olarak dağılımı, hücrenin çalışma başlamasıyla beraber kısa

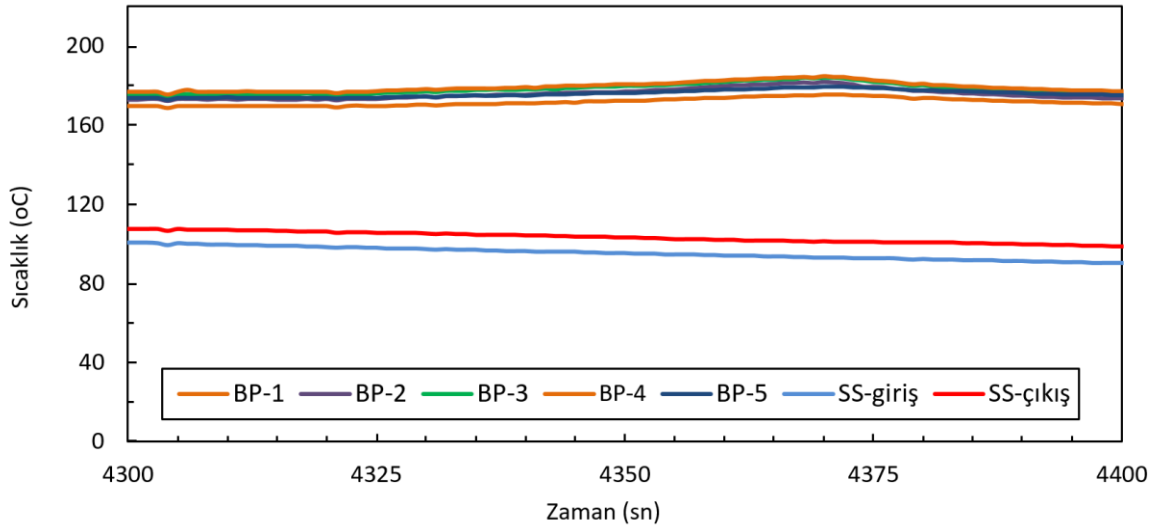
sürede gerekli çalışma sıcaklığına ulaşabilmesi için yığımda homojen bir sıcaklık dağılımı olması gerekmektedir. Çalışmada ilk olarak tasarlanan ve üretilen PEM yakıt hücresinde hücre yalıtımı yapılmadan deneyler gerçekleştirilmiştir. 6 hücreli yakıt hücresi yığını ile yapılan ön çalışma hazırlanan yığımda kullanılan malzemelerin tasarımın herhangi bir gaz kaçağı, kısa devre vb. soruna yol açmadığını göstermiştir. Şekil 4'de 160°C çalışma sıcaklığında elde edilen polarizasyon eğrisi verilmiştir. 6 hücreli YSPeM yakıt hücresi yığınının, her bir hücresinden yaklaşık ~0.94 V açık devre voltajı elde edilmiştir. Her bir hücre için 0.6 V çalışma voltajında, toplamda 3.6 V yığın voltajı için sistemden ~120 W güç elde edilmiştir. Hücrede özellikle her bir hücre için 0.45 V hücre voltajının altına düşüldüğünde yığımda performans düşmesi belirlenmiştir. Sistemde yüksek akım değerlerinde karşılaşılan bu sorun sistemde oluşan fazla sudan kaynaklanmaktadır. Sistemden maksimum 225 W güç elde edilmiştir.



Şekil 4. Yalıtım yapılmış yüksek sıcaklık PEM yakıt hücresi polarizasyon eğrisi.



Şekil 5. 160°C hücre çalışma sıcaklığı için yalıtımlı hücre ve soğutucu sıvı sıcaklıkları (BP: bipolar plaka; SS: soğutma sıvısı).



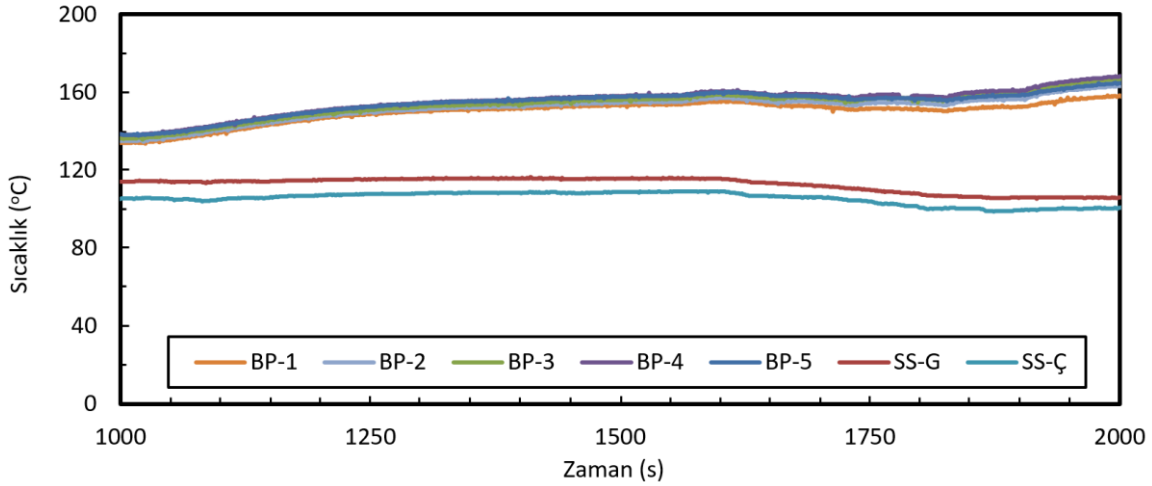
Şekil 6. 170°C hücre çalışma sıcaklığı için yalıtımlı hücre ve soğutucu sıvı sıcaklıkları (BP: bipolar plaka; SS: soğutma sıvısı).

PEM yakıt hücresinde üretilen ısıyı uzaklaştırmak için kullanılan soğutma sıvısı sirkülatör kullanılarak sisteme beslenmiştir. Yalıtım yapılmış sistemde 3.6 V yığın voltajında sabit akım çekildiği durumlarda kullanılan soğutucu akışkanın, hücreye giriş ve çıkış sıcaklıklarının sırasıyla 95-105°C ±5° de olduğu belirlenmiştir. Soğutucu akışkanın debisi hücrenin gücüne göre 5 ve 25 lt/dakika (0.071-0.353 kg/s) arasında değiştirilebilmekte ve gerekli soğutmayı sağlayabilmektedir. Yığın bipolar plakalarında da ±5°C'lik sıcaklık farkı belirlenmiştir. Bipolar plakalar arasında sıcaklık farkının düşük olması yapılan hesaplamalar sonucunda belirlenen 1 cm'lik cam yünü yalıtım ile etkin bir soğutmanın yapıldığını göstermektedir.

Şekil 5 ve 6'da sırasıyla 160°C ve 170°C sıcaklıklarda PEM yakıt hücresi bipolar plakaları ve kullanılan soğutma sıvısı giriş ve çıkış sıcaklıkları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bipolar plaka sıcaklıkları arasında ~ ± 5°C

sıcaklık farkı belirlenmiştir. Soğutma suyu giriş ve çıkış sıcaklıkları arasında her iki çalışma sıcaklığında da ~ 10°C fark belirlenmiştir.

Şekil 7'de yalıtım yapılmayan yüksek sıcaklık PEM yakıt hücresi ile yapılan deneyler sonucunda elde edilen bipolar plakalar ve kullanılan soğutma sıvısı giriş ve çıkış sıcaklıkları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Hücre sıcaklığı 3.6 V'da 160°C olarak ayarlandığı halde yalıtım yapılmayan PEM yakıt hücresi yığını 160°C çalışma sıcaklığına ulaşmamıştır. Sistemden daha fazla güç çekilerek çalışma sıcaklığına ulaşmaya çalışılmış ancak ilk ve son hücrelerin bipolar plakaları arasında ~ 10°C sıcaklık farkı belirlenmiştir. Yakıt hücrelerinde çalışma sıcaklığına bağlı olarak performans değiştiği için hücreler arası 10°C sıcaklık farkı performansı etkilemektedir. Özellikle daha fazla güç üretmek için hücre sayısı fazla PEM yakıt hücresi yığınları kullanıldığında plakalar arası sıcaklık farkı daha fazla olacaktır.



Şekil 7. 160°C hücre çalışma sıcaklığı için yalıtımsız hücre ve soğutucu sıvı sıcaklıkları (BP: bipolar plaka; SS: soğutma sıvısı).

Tablo 2. Yalıtımlı ve yalıtımsız hücrelerde oluşan doğal taşınım ve radyasyon ile ısı kaybı hesapları

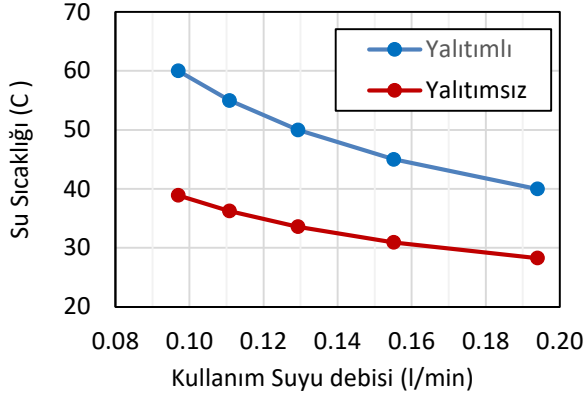
Parametre	Yalıtımsız Hücre		Yalıtımlı Hücre	
	Dikey Plaka	Yatay plaka	Dikey Plaka	Yatay plaka
Rayleigh sayısı	2.18x10 ⁷	2.19x10 ⁵	3.53x10 ⁶	3.56x10 ⁴
Nusselt sayısı	40.1	11.7	23.9	7.4
Taşınım katsayısı (h-W/m ² K)	6.33	8.54	3.8	5.4
Doğal taşınım ısıl direnci (R _K -°C / W)	1.58	3.9	2.56	6.1
Radyasyon ısıl direnci (R _R -°C / W)	1.15	8.6	1.55	10.6

Yalıtımlı ve yalıtımsız hücrelerde oluşan doğal taşınım ve radyasyon ile ısı kaybı hesapları sonucu elde edilen değerler Tablo 2'de görülebilir. Hesaplamalar yatay ve dikey plakalarda ayrı ayrı yapılmıştır.

Kojenerasyon Çalışmaları

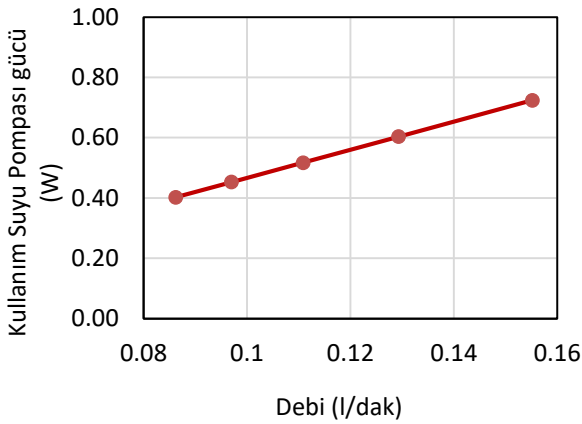
Şekil 3'de verilen kojenerasyon sisteminde, hücre yığınının soğutulması ile açığa çıkan atık ısı, 15-20°C'lik şebeke suyunun ısıtılması için kullanılmaktadır. Pompa yardımı ile devir daim yapan kullanım suyu, yakıt hücre sistemi soğutmasında kullanılan akışkan vasıtasıyla ısıtılabilir. Şekil 7'de, hücre yığınının yalıtımlı ve yalıtımsız durumları için kojenerasyon sisteminde, kullanım suyunun debisine göre sistemden elde edilebilecek maksimum kullanım sıcaklığının grafiği görülmektedir.

Şekil 8'den de görülebileceği gibi, su sıcaklığı yalıtımlı durumda ortalama 60°C'ye kadar ulaşırken, yalıtımsız hücre kullanıldığı durumda 40°C'ye ancak ulaşabilmektedir.



Şekil 8. 220 W elektrik gücü için maksimum kullanım suyu sıcaklığı- debi grafiği

Bunun sebebi yalıtım yapılmadan önceki durumda hücre yığını çalışırken yaklaşık 110 W ısı kaybı (~% 45) olmasıdır. Bu kayıp, hücre sıcaklığı ortalama 25°C'de bulunan ortam sıcaklığından çok yüksek olduğu için, hem doğal taşınım hem de radyasyon yolu ile olmaktadır. Bununla beraber yalıtımsız durumda hem hücre yığını çalışma sıcaklığına ulaşamamakta, hem de sıcaklık hücreler içerisinde homojen olarak dağılmamakta ve bu da hem hücrenin elektrik üretim performansını, hem de kojenerasyon sisteminin ısı performansını ve kapasitesini oldukça zayıflatmaktadır.



Şekil 9. Kullanım Suyu Pompası Gücü-Debi Grafiği

Hücre yığını ortalama 160°C sabit sıcaklıkta çalışırken soğutma sıvısı ve hücre soğutma kanalları arasında logaritmik ortalama sıcaklık farkı 34.5 °C, yüzey alanı-toplam ısı aktarım katsayısı çarpımı ise yaklaşık 7.17 W/°C olarak hesaplanmıştır. Deneyler ve analizler sonucu hesaplanan pompa gücü verilerine göre, soğutucu akışkan sirkülasyonu için kullanılan değişken devirli pompanın gücü 2 ila 10 W arasında değişmektedir. Kullanım suyu sirkülasyonu için kullanılan değişken devirli pompanın ortalama gücü ise 0.75 W olarak hesaplanmıştır. Şekil 9 da farklı debi değerleri için hesaplanan pompa gücünün değişim grafiği görülmektedir.

SONUÇLAR

Bu çalışmada, temiz ve güvenilir modüler güç üretim tekniklerinden biri olan, ve yüksek verimlilikleri ve çevre dostu olmaları nedeniyle yüksek sıcaklık PEM yakıt hücreleri kullanılarak mikro-kojenerasyon sistemi tasarlanmıştır. Çalışmada kullanılan yüksek sıcaklık PEM yakıt hücresinde 160°C çalışma sıcaklığının olmasından dolayı PBI membran temelli membran elektrot ataçları (MEA) kullanılmıştır. Hidrojen ve hava kullanılarak gerçekleştirilen yakıt hücresi testleri sonucunda 6 hücreli PEM yakıt hücresi yığınının, her bir hücresinden yaklaşık ~0.94 V açık devre voltajı elde edilmiştir. Yakıt hücresinden elde edilen maksimum güç 225 W'dır. Yakıt hücresinden maksimum performans için hücrede üretilen ısının sürekli olarak hücreden uzaklaştırılması ve hücrenin sabit sıcaklıkta çalışması gerekmektedir. Çalışmada hedeflenen mikro-kojenerasyon uygulaması ile yakıt hücresinin ürettiği ısı hücrelerin arasından geçirilen bir soğutucu akışkan ile uzaklaştırılmaktadır. Çalışma sırasında sıcaklığın hücre içerisinde homojen olarak dağılımı, hücrenin çalışmaya başlamasıyla beraber kısa sürede gerekli çalışma sıcaklığına ulaşabilmesi ve kojenerasyon uygulaması sırasında atık ısıdan maksimum faydanın sağlanabilmesi için hücrenin ısı yalıtımı yapılmıştır. Yalıtımlı ve yalıtımsız PEM yakıt hücresi testlerinde yakıt hücresi yığını oluşturan hücreler sırasıyla ~ ± 5°C ve ~ ± 10°C sıcaklık farkları belirlenmiştir. 1 cm cam yünü yalıtım ile PEM yakıt hücresi yığını hücreleri arasında sıcaklık farkı düşürülmüş ve daha etkin bir soğutma yapılmıştır. Çalışmada hazırlanan kojenerasyon sistemi vasıtasıyla hücre yığınının soğutulması ile açığa çıkan atık ısı, 15-20°C'lik şebeke suyunun ısıtılması için kullanılmıştır. Kullanım suyu sıcaklığı yalıtımlı durumda ortalama 60°C'ye kadar ulaşırken, yalıtımsız hücre kullanıldığı durumda ancak 40°C'ye ulaşabilmektedir. Elde edilen veriler Yakıt hücresi mikro-kojenerasyon uygulamasının kullanılabilirliğini göstermektedir. Özellikle şebekeden bağımsız uygulamalarda, yenilebilir enerji ile entegre edilecek yakıt hücresi sistemleri ile hem ısı hem de elektrik ihtiyacı şebekeden bağımsız karşılanabilecektir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırmalar Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 1001 projeleri kapsamında 214M301 nolu Araştırma Projesi kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

Arsalis, A., Nielsen, M.P. and Kær, S.K. 2011, Modeling and off-design performance of a 1 kWe HTPMFC (high temperature-proton exchange membrane fuel cell)-based residential micro-CHP combined-heat-and-power system for Danish single-family households, *Energy*, 36, 5010-5020.

Arsalis, A., Nielsen, M.P., Kær, S.K. 2012, Modeling and optimization of a 1 kWe HT-PEMFC-based micro-CHP

- residential system, *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, 2470-2481.
- Babir F., 2012. *PEM Fuel Cells* (Second Edition), Elsevier, USA.
- Caizhi Zhang , Tao Yu , Jun Yi , Zhitao Liu, Kamal Abdul Rasheedj Raj, Lingchao Xia , Zhengkai Tu and Siew Hwa Chan, 2016, Investigation of heating and cooling in a stand-alone high temperature PEM fuel cell system, *Energy Conversion and Management*, 129, 36–42.
- Campanari, S, Valenti G, Macchi E, Lozza G, Ravidà N, 2014, Development of a micro-cogeneration laboratory and testing of a natural gas CHP unit based on PEM fuel cells, *Applied Thermal Engineering*, 71/2, 714-720.
- Chandan, A., Hattenberger, M., El-kharouf, A., Du, S., Dhir, A., Self, V., Pollet, B.G., Ingram, A., Bujalski, W., 2013, High temperature (HT) polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFC), *Journal of Power Sources*, 231, 264-278.
- Devrim Y., Devrim, H. and Eroglu, I., 2016, Polybenzimidazole/SiO₂ hybrid membranes for high temperature proton exchange membrane fuel cells, *Int. J. Hydrogen Energy*, 41, 23, 10044-10052.
- Ergun, D., Devrim, Y., Bac, N., Eroglu, I. 2012., Phosphoric acid doped polybenzimidazole membrane for high temperature PEM fuel cell, *Journal of Applied Polymer Science*, 124, 267–277.
- Frank P. Incropera, David P. DeWitt, Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, 2007, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (6th Ed.), Wiley, USA.
- Gandiglio, M., Lanzini, A., Santarelli, M., Leone, P., 2014, Design and optimization of a proton exchange membrane fuel cell CHP system for residential use, *Energy and Buildings*, 69, 381-393.
- Kuhn, V., Klemes, J., Bulatov, I., 2008, MicroCHP: overview of selected technologies, products and field test results, *Appl Therm Eng*, 28, 2039-2048.
- Lin, L., Zhang, C., Liu, C., Dong, M., Zhang, L., Deng, P., Sun, H., Huang, H., Liu, H., Zhang, Y., 2014, Y type zeolites/PI membranes for sulfur-free hydrogen source and for fuel cell applications, *International Journal of Hydrogen Energy*, 39, 4704-4709.
- Özgirgin E., Devrim Y. and Albostan A. 2015, Modeling and simulation of a hybrid photovoltaic (PV) module-electrolyzer-PEM fuel cell system for micro-cogeneration applications. *Int. J. Hydrogen Energy*, 40, 15336-15342.
- Rohsenow W, Hartnett J, Cho Y, 1998, *Handbook of Heat Transfer*, McGraw-Hill Professional, USA
- Santangelo, P.E., Tartarini, P., 2007, Fuel cell systems and traditional technologies. Part I: Experimental CHP approach, *Appl Therm Engineering*, 27, 1278–84.
- <http://www.members.fchea.org/core/import/PDFs/Technical%20Resources/FCHEA-MCWG-LeakTestingDocument.04-070.pdf>