



ISI BORULU VAKUM TÜPLÜ TERMoeLEKTRİK GÜNEŞ JENERATÖRÜ TASARIMI VE UYGULAMASI

Abdullah Hakan YAVUZ^{1,*} 

¹ Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 60250, Tokat, Türkiye

ÖZET

Bu çalışmada, ısı borulu vakum tüplü termoelektrik güneş jeneratörün (IBVTTGJ) yük karakteristikleri uygulamalı olarak incelenmiştir. IBVTTGJ güneşin oluşturduğu ısıyı hem direkt elektrik enerjisine dönüştürür, hem de sıcak su üretir. IBVTTGJ’de maksimum güç termoelektrik modülün (TEM) iç direnci ile bağlanan yükün direnç değeri eşit olduğunda elde edilir. Mevcut güneş kolektörlerini geliştirerek veya yeni nesil IBVTTGJ tasarlanarak hem sıcak su hem de elektrik üretmek mümkündür. 57 derecelik sıcaklık farkı ile 0,4 metrekarelik kolektör yüzeyinden 38 W’lık elektriksel güç üretilmiştir. Üç farklı teknolojiyi içeren IBVTTGJ çevre dostu olduğu gibi güneş enerjisini daha verimli kullanılmasını sağlayan bir ürün olduğu gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Termoelektrik jeneratörler, Isı borular, Güneş kolektörleri, Enerji verimliliği, Yenilenebilir enerji.

DESIGN AND APPLICATION OF THERMOELECTRIC SOLAR GENERATOR WITH HEAT PIPED VACUUM TUBE

ABSTRACT

In this study, the load characteristics of thermoelectric solar generator with heat pipe vacuum tube (HPVTTSG) were examined in practice. Thermoelectric solar collector with heat pipe vacuum tube converts the heat generated by the sun into direct electrical energy and produces hot water. The maximum power in the HPVTTSG is obtained when the internal resistance of the thermoelectric module is equal to the resistance value of connected load. It is possible to produce both hot water and electricity by developing existing solar collectors or by designing a new generation HPVTTSG. With a temperature difference of 57 degrees, 38 W of electrical power is produced from the collector surface of 0.4 sqm. HPVTTSG, which includes three different technologies, has been shown to be a product that makes solar energy more efficient as it is environmentally friendly.

Keywords: Thermoelectric generators, Heat pipe, Solar collectors, Energy efficiency, Renewable energy.

1. GİRİŞ

Hızla artan nüfus artışı ve sanayileşmeye paralel olarak dünyada enerji ihtiyacı artmakta ve kullanılan enerjinin büyük çoğunluğu çevreye zararlı olan fosil yakıtlardan elde edilmektedir. Fosil yakıtları esas alan enerji kullanımı; yakıt konusunda dışa bağımlılık, yüksek ithalat giderleri ve çevre sorunları gibi önemli olumsuzlukların yanında, dünya fosil yakıt rezervlerinin hızla tükenmesi sebebiyle yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini artırmaktadır.

Tüm enerji kaynaklarının kaynağı olan güneş en temiz enerjidir. Güneş enerjisi temel iki etkisi termal ve ışıma etkisidir. Işıma enerjisi fotovoltaik paneller vasıtasıyla, termal enerji ise termoelektrik (TE) yöntem ile doğrudan elektrik enerjisine çevrelebilmektedir. Fotovoltaik (PV) paneller günümüzde yaygın olarak kullanılmasına rağmen termoelektrik güneş panelinden söz etmek mümkün değildir. Ancak güneş ısı güneş kolektörleri vasıtasıyla su ısıtmak için çok geniş bir coğrafyada kullanılmaktadır. Başta Türkiye olmak üzere birçok ülkede güneş kolektörleri üretilmekte ve sıcak su üretiminde kullanılmaktadır. Güneş kolektörlerin çok farklı modelleri, güç ve kapasite olarak çeşitleri mevcuttur. Ancak güneş kolektörlerinde toplanan ısının çok az miktarı su ısıtmada kullanılmaktadır [1,2]. Güneşten gelen ısının %60’ı yine çevreye atılmaktadır ve çevreyi kirletmektedir [3,4]. Termoelektrik jeneratörler (TEJ) hareketli parçaları olmaması, basit yapıda olmaları, bakım gereksinimlerinin az olması, ömürlerinin uzun olması, kontrolünün kolay olması ve ara elemana ihtiyaç duymadan dönüşüm yapabilmesi nedeniyle atık ısının değerlendirilmesi açısından büyük öneme sahiptir. Bu avantajlarının yanı sıra yüzeyler arasındaki sıcaklık farkına bağlı olarak verimlerinin değişmesidir. TEM’lerin yüzeyleri arasındaki sıcaklık

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: hakan.yavuz@gop.edu.tr

Geliş / Received: 11.10.2018 Kabul / Accepted: 28.07.2019 doi: 10.28948/ngumuh.681302

A.H.Yavuz

farkı 100 °C ve üzerine çıkarıldığında verimlerinin yaklaşık %10'lardan %40'lara kadar çıkabilmektedir [4]. Ticari olarak bakıldığında bir PV panelin ürettiği elektrik gücün maliyeti ortalama 1,5W/€ iken bir TE panelinki 1,5W/\$'dır. Ekonomik olarak daha avantajlıdır [5]. Birim alan başına elde edilen güç dikkate alındığında daha da avantajlı durumdadırlar [6].

Bu çalışmada, güneş kolektöründe toplanan ısıyı elektrik enerjisine dönüştürerek çevreyi koruyan ve enerjinin daha verimli kullanılmasını sağlayan ısı borulu vakum tüplü termoelektrik güneş jeneratörü tasarlanmış, yapılmış ve incelenmiştir.

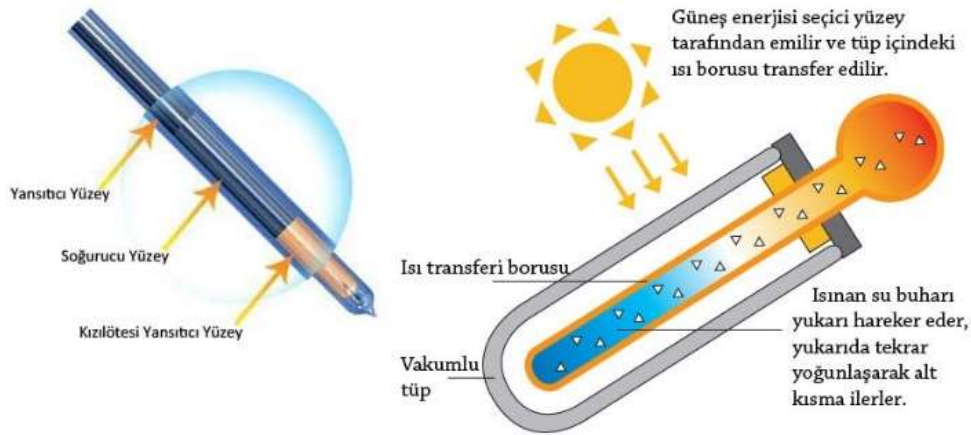
2. MATERYAL VE METOT

2.1. Isı Borulu, Vakum Tüplü Termoelektrik Güneş Jeneratörünün Yapısı

Isı boruları (IB) ısı yalıtma ve ısı transfer metotlarından en etkilisidir. Ek olarak IB'lar termal köpürüleme hidrojen yükü oranını artırarak bütünleşmiş yakıt hücresi ve metal hidrojen tanklarının termal yönetiminde kullanılır [7,8]. IBVTTGJ üç farklı sistemin bir araya gelmesi ile oluşmaktadır [9].

- Güneş kolektörü,
- Isı borusu
- Termoelektrik jeneratör bloğu.

Güneş kolektörleri ışık enerjisini ısı enerjisine çeviren sistemlerdir. En önemli özelliği ısı enerjisini maksimum düzeyde tutabilmesidir. İç içe geçmiş iki silindirik tüp şeklinde borosilikat camdan oluşmaktadır. Yapısı Şekil 1'de gösterilmektedir. Vakum tüp diye isimlendirilen kolektörler hava yoluyla oluşan ısı transferini (konveksiyon) ortadan kaldırmaktadır. İç içe geçmiş iki tüp arasındaki vakum basıncı 5×10^{-3} Pa'dır. Tüpler arasındaki vakumu muhafaza etmek için baryum elementi kullanılır. İçteki tüpün dış yüzeyi özel seçici bir yüzeye kaplanmıştır. Seçici yüzey kaplaması için (Al-N/Al)(Alüminyum/Azot/Alüminyum) ve (ALN/AIN-SS/Cu) (Alüminyum nitrid/AIN-SS/Bakır) kullanılmaktadır. NASA tarafından bulunan seçici yüzey ile güneş ışınları mükemmel bir şekilde emilip ısıya çevrilir ve yansıma minimum düzeye indirgenir. Seçici yüzey, kısa dalga boyu (0,2-2,5 um) ışınımın büyük bir bölümünü emer, uzun dalga boylu (2,5-50 um) ışınım geri yayılımını minimize eder. Böylece plakaların sıcaklığı artırılır ve kullanılan materyale daha fazla ve hızlı ısı iletimi sağlanır. Bu işlem verimin artmasına neden olur.



Şekil 1. Isı borulu vakum tüplü (IBVT) güneş kolektörlerinin yapısı.

Isı boru sistemi kapalı bir bakır boru içerisine yerleştirilen bir sıvıdan ibarettir. Isı boru alüminyum kanatçıklar arasına yerleştirilmiştir. Isı enerjisini boru içerisindeki sıvıya aktarma işlevini yerine getirir. Boru içerisindeki sıvının sıcaklığı 25 °C ulaştığında sıvı faz değiştirilerek buharlaşır ve boru üst ucunda birikir. Boru üst yüzeyindeki ısı başka bir malzeme üzerine transfer edilir. Isı kaybettiği için yoğunlaşarak boru alt seviyesine geri iner ve çevrim sürekli olarak tekrar edilir. Temel olarak prensip dıştaki saydam cam boru veya cam plaka güneş ışınlarının iç boruya gelmesine olanak sağlar. İç boru siyah yüzeyi aracılığı ile ışınları toplar ve kendi içinden geçen akışkanı ısıtır. Isınan suyun hacmi artarak yoğunluğu azalır ve yukarı doğru hareket etmesidir.

2.2 Termoelektrik modüller ve karakteristikleri

Bir termoelektrik modül temelinde TE'lerden meydana gelir. TE p-tip ve n-tip yarıiletkenlerin bir iletken ile birleştirilmesinden oluşur. Bir modülde TE'ler elektriksel açıdan seri termal olarak da paraleldir. Termoelektrik etki 19. Yüzyılın ilk yarısında 1821 yılında Alman fizikçi Thomas Seebeck tarafından ilk olarak keşfedilmiştir. Seebeck, iki farklı metal iletkenin bir devrede, iletkenlerin birleşme noktaları farklı sıcaklıklarda tutulduğu zaman iletkenlerin uçlarında bir gerilim oluştuğunu gözlemlemiştir. Sıcaklık ve gerilim arasındaki bu katsayı Seebeck Katsayısı (α) olarak adlandırılır. Seebeck etkisi TEJ'lerin temelini oluşturmaktadır. TEJ'ler mevcut birincil enerji üretim cihazlarının yerini alması şu an itibarıyla olası olmamakla birlikte, genel enerji sisteminin verimliliğini artırmak için ek bir enerji üretebilmektedir [10]. Bunun nedeni termoelektrik jeneratörlerin verimlerinin alternatif teknolojilere göre düşük olmasıdır. Termoelektrik üzerine yapılan araştırmalar bu verimliliğin artırılması üzerine yoğunlaşmıştır. Bir TE sistemin enerji dönüşüm verimi η aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\eta_{\max} = \frac{(T_H - T_C)}{T_H} \times \frac{\sqrt{1 + ZT_{\text{ave}}} - 1}{\sqrt{1 + ZT_{\text{ave}}} + \frac{T_C}{T_H}} \quad (1)$$

Burada T_H ve T_C sırasıyla sıcak ve soğuk yüzey sıcaklıkları, T_{ave} , T_H ve T_C 'nin ortalamasıdır ve ZT figüre-of-merit (kalite faktörü) olarak bilinir ve aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$ZT = \frac{\alpha^2}{KR_{\text{TEJ}}} T \quad (2)$$

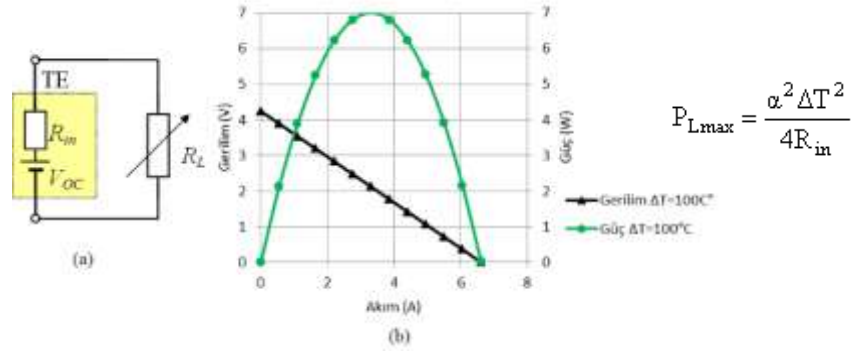
Burada R_{TEJ} , α , ve K sırasıyla TEJ iç direnci, Seebeck katsayısı ve termal iletkenliktir. Boyutsuz bir nicelik olan figüre of merit (ZT) uygulamalar için termoelektrik malzemelerin kalitesini veren bir büyüklüktür [11]. ZT arttıkça termoelektrik enerji dönüşüm oranı artmaktadır. ZT'nin maksimum olması için termoelektrik materyallerin yüksek elektriksel iletken, yüksek seebeck katsayısı ve düşük termal iletkenlik özelliklerine sahip olması gerekir [12]. Bu nedenle termoelektrik materyaller üzerinde yapılan araştırmalar bu özelliklerin iyileştirilmesine yönelmiştir [10]. Solar enerjili TEJ'lerin performansı gerçek çalışma şartlarında değerlendirilir. Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar, solar TEJ tasarımında uygun TE malzemeler kullanılarak güç üretim veriminin etkili bir seviyeye yükseltilebileceğini göstermektedir [13]. Solar TEJ'ler üzerine yapılan bir çalışmada mevcut malzemeler kullanılarak sıcaklık dayanım özelliklerinin artırılarak %25 verim artışı ile %14,1 toplam verime erişilebileceğini göstermiştir [14].

TEJ ile ilgili mevcut literatür çok sınırlı olması bu alanda araştırma yapmak için motive edici bir unsurdur. Bu çalışmada TE modülleri, TE malzemelerin termofiziksel ve elektriksel özellikleri, ısı transfer sistemleri tasarımını içeren komple bir sistem tasarımı yapılmıştır. Ayrıca hiçbir yoğunlaştırıcı yapı kullanılmadan sistemin genel performans testleri yapılmış ve parametreleri tespit edilmiştir.

Termoelektrik modülün elektriksel devre modeli Şekil 2 a'da verilmiştir. TEJ'den çekilen akım artarsa harcanan güçte artar. Termoelektrik modülün yüzeyleri arasında bir sıcaklık farkı meydana geldiğinde ve çıkışa bir yük bağlandığında, yük üzerinden devre tamamlanır ve akım çekilir. Bir güç elde edilir [1,2].

Termoelektrik modülden elde edilen güç, TEM yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkının ($\Delta T = T_H - T_C$) karesi ile orantılı olarak değişmektedir. Bir TEJ'den alınabilecek maksimum güç $R_L = R_{\text{TEJ}}$ olduğunda elde edilir. TEJ çıkış karakteristiği Şekil 2 b'de gösterilmiştir. ΔT sabit tutularak R_L değiştirildiğinde, TEJ'den elde edilen güç değişir. Maksimum güç açık devre gerilimi yani yük direncinin sonsuz olduğu durumdaki gerilim ile kısa devre akımı yani yük direnci sıfır olduğunda çekilen akımla orantılıdır.

A.H.Yavuz



Şekil 2. (a) Termoelektrik modülün elektriksel devre modeli, (b) TE V-I grafiği.

Maksimum güç transferi için iç direncin yük direncine eşit olması şarttır. Böylece sistemin yük özellikleri elde edilmiştir. TEM yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı, modülün seebeck katsayısı, elde edilen gücün değeri üzerinde etkilidir ve bu değişim paraboliktir [1,2].

2.3 Deneysel Kurulum

IBVTTGJ yapısı ve kurulumu şekil 3’de verilmiştir. Bu sistem taşınabilirdir. IBVTTGJ ölçüm sistemi dört kısımdan meydana gelmektedir: (i)TEM, (ii)güneş ölçer, (iii)sıcaklık ölçer, (iv)elektronik yük. Sıcaklıklar fluke dijital termometreyle, güneşten gelen ısı yoğunluğu daystarmetre ile ölçülmüştür. Dirençler ise elektronik yük mainframe cihazı ile sisteme uygulanmış ve akım, gerilim değeri yine aynı cihazla ölçülmüştür.



Şekil 2. IBVTTGJ yapısı ve kurulumu

IBVTTGJ tasarımında TE-MOD-10W4V-40 jeneratör modülleri kullanılmıştır. 4x4 cm boyutlarında açık devre voltajı 8 V, direnci 1,59 Ω ve çıkış akımı 3,4 A olan modüllerin nominal gücü 10 W’dir. Jeneratör modülleri 300 $^{\circ}\text{C}$ ’ye kadar

ISI BORULU VAKUM TÜPLÜ TERMOELEKTRİK GÜNEŞ JENERATÖRÜ TASARIMI VE UYGULAMASI

kullanılabilmektedir. Sistem içerisinde 8 adet jeneratör modülü elektriksel olarak seri bağlanmıştır. Termal iletkenliği artırmak için termal macun kullanılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Deneyler 31 °C çevre sıcaklığında yapılırken güneş güç yoğunluğu 21 Ağustos itibarıyla 1750 W/m² olarak ölçülmüştür. Modül yüzeyindeki sıcaklıklar T_H=95 °C, T_C=38 °C olarak ölçülerek ΔT= 57 °C olarak hesaplanmıştır. Kollektör yüzey alanı 0,4 m² olarak hesaplandığından kollektör yüzeylerine gelen ısı güç 700 W olarak alınmıştır. Türkiye’de güneşlenme süresi ortalama 7 saat olarak alındığında kollektörün 1 günde ürettiği ortalama ısı güç 7x3600x700 W =17.640 KWSaat olarak hesaplanmıştır.

Kollektörden elde edilen ısı güç gün sonunda 50 lt’lik bir depodaki suyun sıcaklığını 15 °C’den 95 °C’ye çıkaracağı varsayılarak termal güç aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$Q = m_{su} \times C_{su} \times \Delta T / (\tau) = (50 \text{ kg}) \times (4180 \text{ j/kg}^\circ\text{C}) \times (80^\circ\text{C}) / (14,37 \text{ saat} \times 60 \text{ dakika} \times 60 \text{ s}) = 323 \text{ W}$$

Burada m_{su} suyun kütlesi (kg), Q suya verilen ısı (W), C_{su} suyun öz ısısı (J/kg°C), ΔT sıcaklık farkı (°C) ve τ zaman sabitidir. 14,37 katsayısı yapılan çalışmada gün boyunca yeterli ışınının sağlandığı süredir. Yani kollektörden elde edilen 700 W’lık ısı enerjinin sadece 323 W’ı kullanılırken 377 W’lık kısmı çevreye atılarak çevreyi kirletmektedir.

IBVTTGJ üzerinde yapılan testlerde elektronik yük kullanılarak açık devre testi yapılmıştır. Sonraki testlerde 30 Ω’dan başlayarak 0 Ω’a kadar yük değerleri değiştirilmiş ve akım, gerilim değerleri ölçülmüştür. Ölçülen değerler Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. IBVTTGJ verileri

R_L, Ω	U_{TE}, V	I_{TE}, A	P_{TE}, W
∞	44,5	0	0
30	40	0	0
25	33	1,05	34,65
20	24	1,5	36
15	19	2	38
10	12	2,3	27,6
5	9	2,5	22,5
0	0	7	0

Tablo 1’de görüldüğü gibi IBVTTGJ’den elde edilen maksimum güç 38 W olmuştur. Buna karşılık gelen direnç değeri ise 15 Ω’dur. Maksimum güç transferinin sağlandığı noktadır. IBVTTGJ çıkışlarında elde edilen gerilim 19 V ve akım 2 A olarak ölçülmüştür. 5 adet ısı borulu vakum tüp kullanılarak jeneratöre aktarılan enerji 5x60 W=300 W’tır. Bu enerjinin 38 W’ı geri kazanılmıştır. Verim %12,6 olarak hesaplanmıştır. 15 Ω’un altında ve üstündeki direnç değerlerinde gücün düştüğü görülmüştür. Bunun nedeni empedans uyumsuzluğudur. TEJ’lerin performansının artırılması için maksimum güç noktası izleme donanım ve yazılımlarını kullanmak mümkündür.

IBVTTGJ verimi düşük olmasına rağmen var olan bir sistemdeki işleyişi bozmadan ekstra bir enerji üretimi yapmaktadır. Atmosfere atılacak bir ısıyı kullanarak elde edilen bu enerji enerji verimliliği açısından önemlidir. Yüzeyler arasındaki sıcaklık farkının artırılması için ısı transfer sistemleri kullanılarak sıcaklık farkının artırılması mümkündür. Isı atılımının artırılması ile beraber verim artışı sağlamak mümkündür.

4. SONUÇLAR

Yüzyılın en önemli problemlerinin başında kirlilik ve enerji gelmektedir. TE teknoloji bu iki problemin çözümü için fayda sağlayan bir teknolojidir. Çevre kirliliğinin nedenleri arasında atık ısı birinci sırada sayılmaktadır. Çevreye yayılan ısının bir miktarını soğurarak hem çevre kirliliğini azaltmakta hem de güç üretimi yaparak enerji ihtiyacına katkı sağlamaktadır. TEJ’lerin uygulama kolaylıkları, ısı atılımı olan tüm sistemlere entegre edilebilmesini sağlamaktadır. Bu çalışmada su ısıtmak için yaygın olarak kullanılan ısı borulu vakum tüplü güneş kollektörlerine TEJ entegre edilmiş ve sistemin işleyişini bozmadan 38 W’lık bir güç elde edilebileceği gösterilmiştir. 0,4 metrekarelik IBVTTGJ’nin yüzeyinden 38W’lık elektrik güç üretilirken

aynı anda 50 litrelik suyun 95 dereceye ısıtılmasını sağlayacak bir potansiyel tespit edilmiştir. Ayrıca IBVTTGJ’de olduğu gibi ısı boru ve termoelektrik teknolojilerin bir arada çok etkili ve verimli olduğu görülmüştür. Her iki teknoloji çevre dostu ve yenilenebilir olup çevrenin ısınmasını önleyen sıcak su ve elektrik üretim işlevini tek bir aygıtta yapabilen sistem test edilmiştir. Bir IBVTTGJ’nin ürettiği elektrik miktarı sadece kolektörün büyüklüğüne göre değil sıcaklık farkına bağlı olarak parabolik artığına göre başta Türkiye’nin sıcak bölgeleri olmak üzere her yerinde kullanılması söz konusudur ve bu durumda üretilen elektriğin maliyeti daha da düşecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Z. S. Omar and F. O. Mehmet, “Concentrated photovoltaic thermal (CPVT) solar collector systems: Part II – Implemented systems, performance assessment, and future directions,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 50, no. 1, pp. 1566–1633, 2015.
- [2] S. Siddharth, K. Mohd and P. Manabendra P, “Performance enhancement of solar collectors—A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 49, no. 1, pp. 192–210, 2015.
- [3] R. Ahıska, H. Mamur and M. Uliş, “Modeling and experimental study of thermoelectric module as generator,” *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 26, no. 4, pp. 889–896, 2011.
- [4] R. Ahıska and H. Mamur, “Comparison of thermoelectric and fotovoltaic solar panels,” *XVI International Forum on Thermoelectricity Paris*, 2015, pp. 26-29.
- [5] R. Ahıska, L. I. Nykyruy, G. Ömer and G. D. Mateik, “The thermoelectric solar panels,” *Journal of Vasyl Stefanyk Precarpathian National University*, vol. 3, no. 1, pp. 9-14, 2016.
- [6] A. E. Özdemir, Y. Köysal, E. Özbas and B. T. Atalay, “The experimental design of solar heating thermoelectric generator with wind cooling chimney,” *Energy Conversion and Management*, vol. 98, no. 1, pp. 127–133, 2015.
- [7] L. Yuzhu, W. Hui, K. P. Ajay and G. A. Suresh, “Role of heat pipes in improving the hydrogen charging rate in a metal hydride storage tank,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 1, pp. 10552-10563, 2014.
- [8] P.T. Anggito, S. Bahman and A. Jhon, “Thermal coupling of PEM fuel cell and metal hydride hydrogen storage using heat pipes,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 1, pp. 4264-4277, 2016.
- [9] Y. J. Dai, H. M. Hu, T. S. Ge, R. Z. Wang and K. Per, “Investigation on a mini-CPC hybrid solar thermoelectric generator unit,” *Renewable Energy*, vol. 92, no. 1, pp. 83 – 94, 2016.
- [10] C. M. Kim, J. W. Seo, J. S. Cha and K. Park, “Electrical transport properties of $\text{Ca}_{0.9}\text{La}_{0.1}\text{xBi}_x\text{MnO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.1$) thermoelectric Materials,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, no.1, pp. 15556-15568, 2015.
- [11] O. Yamashita, “Effect of linear temperature dependence of thermoelectric properties on energy conversion efficiency,” *Energy Conversion of Management*, vol. 49, no. 1, pp. 3163-3169, 2008.
- [12] L. E. Bell, “Cooling, heating, generating power, and recovering waste heat with thermoelectric systems,” *Journal of Science*, vol. 321, no. 1, pp.1457-1461, 2008.
- [13] T. Ming, W. Yang, Y. Wu, Y. Xiang, X. Huang, J. Cheng, X. Li and J. Zhao, “Numerical analysis on the thermal behavior of a segmented thermoelectric generator,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 57, no. 1, pp. 1-15, 2016.
- [14] L. L. Baranowski, G. J. Snyder and E. S. Toberer, “Concentrated solar thermoelectric generators,” *Energy & Environmental Science*, vol. 5, no. 1, pp. 9055–9067, 2012.

