

---

Makale / Research Paper

---

## İçten Yanmalı Motor Atık Isılarının Geri Kazanımında Termoelektrik Jeneratörlerin Kullanımı

M. Akif KUNT\*

\* Dumlupınar Üniversitesi, Tavşanlı MYO, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Kütahya

**Geliş/Received:** 18.12.2015

**Düzeltilme/Revised:** 01.04.2016

**Kabul/Accepted:** 28.04.2016

**Özet:** Termoelektrik jeneratörler sıcaklık farkından elektrik enerjisi üreten yarı iletken yapılardır. İçten yanmalı motorlarda termoelektrik jeneratörlerin kullanımı yakıt ekonomisi sağlamak, emisyonları azaltmak ve motor verimini yükseltmek için iyi bir teknolojik yöntemdir. İçten yanmalı motorlarda piston üzerinde elde edilen ısı gücün yaklaşık %70'i egzoz ve soğutma yoluyla kaybedilmektedir. Motor sürtünme kayıpları sonrasında motor çıkış milinde %25 oranında bir faydalı enerji elde edilmektedir. Bu çalışmada içten yanmalı motorların atık ısılarının geri kazanımında kullanılan TEJ modüllerin yapısı, egzoz ve soğutma suyundan atılan ısının geri kazanımı konusunda yapılan uygulamalar anlatılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Atık enerji, termoelektrik jeneratör, içten yanmalı motor, egzoz sistem.

---

## Use of Thermoelectric Generators in the Internal Combustion Engine Waste Energy Recovery

**Abstract:** Thermoelectric generators are semiconductor structures that generate electricity from using temperature difference. Use of thermoelectric generator in internal combustion engines is a clean technological way of producing fuel economy, reducing emissions and increasing engine efficiency. Approximately 70% of the thermal power obtained on the pistons in internal combustion engines is lost due to exhaust and cooling. As a result of engine friction losses, 25% of useful energy is obtained on engine output shaft. In this study, structure of TEJ modules used in recovery of waste heats in internal combustion engines, applications about recovering heat revealing from exhaust and cooling water were studied.

**Keywords:** Waste energy, thermoelectric generator, internal combustion engine, exhausts system.

---

### 1. Giriş

Dünyada, enerji güvenliğinin sağlanması ve iklim değişikliğiyle mücadele etmek için yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Ancak, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımında karşımıza çıkan en büyük zorluk, yenilenebilir enerji kaynakları için gerekli olan kurulum maliyetlerinin yüksek oluşudur. TEJ'ler atık ısılarında bulunan sıcaklık farklarından elektrik gücü elde edilmesinde, sıcaklık algılayıcılarında, enerji kaynağı olarak batarya kullanan küçük enerji gereksinimi (saat, kablosuz aklar...) olan cihazlarda yaygın olarak kullanılırlar.[1,2].

*Bu makaleye atıf yapmak için*

Kunt, M.A., "İçten Yanmalı Motor Atık Isılarının Geri Kazanımında Termoelektrik Jeneratörlerin Kullanımı", El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi 2016, 3(2); 192-203.

*How to cite this article*

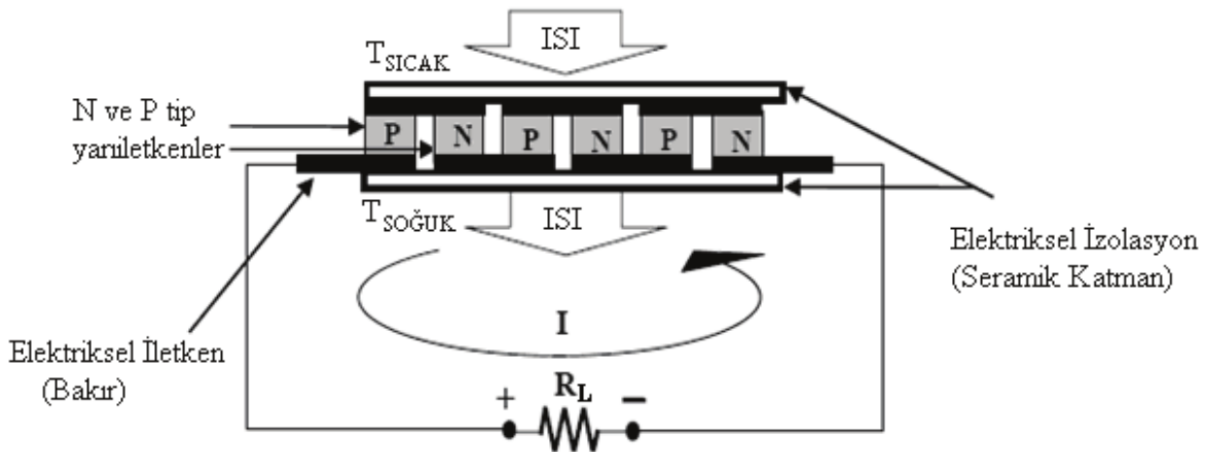
Kunt, M.A. "Use of Thermoelectric Generators in the Internal Combustion Engine Waste Energy Recovery", El-Cezerî Journal of Science and Engineering, 2016, 3(2); 192-203.

Bir TEM, p- ve n-tip yarı iletkenlerin, üretilen elektrik gerilimini arttırmak için elektriksel olarak seri, ısıl genişlemeyi sağlamak için de seramik plakalar yardımıyla termal olarak paralel bağlanmasıyla oluşturulur. Bir TEJ'in uçlarına elektrik yükü bağlanıp, TEJ'in yüzeyleri arasında sıcaklık farkı oluşturulursa, TEJ elektrik gerilimi üretir ve yükten akım geçişi olur. TEJ'den alınan elektrik gücü yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkıyla doğru orantılıdır [3]. Ayrıca ürettikleri gerimde sıcaklık farkı değişimi nedeniyle sürekli değişmektedir. TEJ'in çıkışına bağlanan yük değiştiğinde TEJ'den alınan güçte de değişim olmaktadır. TEJ çıkışını standart gerilim çıkışı haline getirebilmek için dc-dc çevirici kullanılır. Bu nedenle TEJ'den maksimum güç çekilebilmesi için ara devre olarak kullanılan DC-DC çeviricinin maksimum güç çekme özelliğinin olması gerekir [4,5].

İçten yanmalı motorlarda termoelektrik jeneratörlerin kullanılarak atık ısıların geri kazanılması taşıtlarda yakıt ekonomisini arttırmak, CO<sub>2</sub> emisyonlarını azaltmak için alternatif bir yeşil enerji teknolojisidir. İçten yanmalı motorlarda piston üzerinde elde edilen ısıl gücün yaklaşık %70'i egzoz ve soğutma yoluyla kaybedilmektedir [6]. Motor sürtünme kayıpları sonrasında motor çıkış milinde %25 oranında bir faydalı enerji oluşmaktadır. İçten yanmalı motorların atık ısılarının geri kazanımı konusunda özellikle soğutma ve egzoz sistemi üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Termoelektrik enerjinin özellikle ısının atıl durumda, geri dönüşümünün yapılmadığı durumlarda kullanımı ön plandadır. Sobalar, araç egzozları, doğal sıcak su kaynakları, gazlı su ısıtıcıları, güneş ışınlarının odaklanması gibi atık ısının değerlendirilebileceği kaynaklarda kullanılır. Katalitik konvertör sistemi sürüş esnasında oluşan CO ve HC emisyonlarının büyük bir kısmını ortadan kaldırarak zararsız bir hale dönüştürür. Fakat performansları çalışma sıcaklıkları ile sınırlı kalmaktadır. Çalışma sıcaklığına ulaşmaya kadar sistem yüksek performansla çalışmaz. Termoelektrik jeneratör modülü egzoz gazlarının ısısından ürettiği elektrik ile alternatör tarafından üretilen elektrik gücünün önemli bir bölümünü karşıladığından dolayı taşıtların yakıt tüketimini azaltacaktır. Otomobil üzerinde elektrik üretimi için harcanan enerji miktarı ortadan kaldırılabilirse toplam yakıt tüketimi %10 azalacaktır [7].

### 1.1. TEJ Modüllerinin Yapısı

TEJ'in çalışma prensibi 1821'de Thomas Seebeck tarafından bulunmuş olan Seebeck etkiye dayanır. Temelinde termoelementlerden oluşan TEM'ler yer almaktadır. Bir TEM, Şekil 1'deki gibi, p- ve n-tip yarı iletkenlerin, üretilen elektrik gerilimini arttırmak için elektriksel olarak seri, ısıl genişlemeyi sağlamak için de seramik plakalar yardımıyla termal olarak paralel bağlanmasıyla oluşturulur. Bir TEJ'in uçlarına elektrik yükü bağlanıp, TEJ'in yüzeyleri arasında sıcaklık farkı oluşturulursa, TEJ elektrik gerilimi üretir ve yükten akım geçişi olur. TEJ'den alınan elektrik gücü yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkıyla doğru orantılıdır [8].



Şekil 1. TEJ'in temel yapısı [9]

## 1.2. Matematiksel Model

Termoelektrik jeneratör üretimde bulunan firmalar üretilen TEJ'lerde soğuk yüzey sıcaklığı  $T_C$ , sıcak yüzey sıcaklığı  $T_H$ , maksimum güç  $P_{max}$  gibi parametrelerini belirtirler. Maksimum gücün elde edilmesinde en önemli parametreler TEJ iç direnci  $R$ , yük karşılaşmasındaki ( $R_L=R$ ) yük gerilimi  $V_{max}(=VR)$  ve maksimum verimlilik  $\eta_{max}$  tir. Bu verilen değerlerle devrenin elektriksel parametreleri hesaplanabilir. Kullanılacak bir TEJ'in veriminin en yüksek olması için Seebeck sabitinin ( $\alpha$ ) büyük, elektriksel direncin ( $R$ ) düşük ve termal iletkenliğin ( $\kappa_{th}$ ) düşük olması gerekmektedir. TEJ'lerde kalite faktörü (Figure of Merit - FOM) aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$Z = \alpha^2 / R\kappa_{th} \quad (1.1)$$

TEJ'in elektrik direnci  $R$  ve Seebeck sabiti  $\alpha$  aşağıdaki gibidir.

$$R = R_L = V_{max}^2 / P_{max} \quad (1.2)$$

$$\alpha = 2V_{max} / \Delta T \quad (1.3)$$

TEJ'in verimliliği yüke bağlı olarak değişir. Yük direnci  $R_L=mR$  olarak tanımlandığı varsayılır, burada  $m$  yük direncinin iç dirence oranıdır. Akım denklemi aşağıdaki gibidir.

$$I = \alpha \Delta T / [(1 + m)R] \quad (1.4)$$

TEJ'in verimliliği elektrik güç çıkışının sıcak yüzeye uygulanan termal güç girişine oranıdır, aşağıdaki eşitlikle bulunabilir.

$$\eta = I^2 R_L / Q_H \quad (1.5)$$

Ayrıca, TEJ'in verimliliği yeniden formüleleştirilebilir.

$$\eta = mZ\Delta T / \{(1 + m)^2 + Z[(m + 0,5)T_H + 0,5T_C]\} \quad (1.6)$$

Burada  $m_{opt}$  değeri, TEJ maksimumlaştırılmış verimliliğinde  $m$  direnç oranının değeridir. Bu aşağıdaki gibi bulunur.

$$m_{opt} = (1 + ZT_{ave})^{0,5} \quad (1.7)$$

Burada  $T_{ave} = 0,5(T_H + T_C)$  Ticari olarak verilen bir TEJ parametreleriyle, direnç oranı  $m$  aşağıdaki gibi belirlenebilir.

$$m_{opt} = (\Delta T + \eta_{max}T_C) / (\Delta T - \eta_{max}T_H) \quad (1.8)$$

Ayrıca FOM değeri aşağıdaki gibi bulunur.

$$Z = (m_{opt}^2 - 1) / T_{ave} \quad (1.9)$$

TEJ termal iletkenliği, aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\kappa_{th} = \alpha^2 / RZ \quad (1.10)$$

Maksimum gc üretimdeki verim  $\eta_{max}$  olduğu durumda, akım değeri aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$I_{max} = \alpha \Delta T / 2R \quad (1.11)$$

Verim aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\eta_{max} = Z \Delta T / [4 + Z(1,5T_H + 0,5T_C)] \quad (1.12)$$

Verim verilmişse FOM değeri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$Z = 4\eta_{TEG}^{max} / [\Delta T - \eta_{TEG}^{max}(1,5T_H + 0,5T_C)] \quad (1.13)$$

Sonunda, eşitlik 1.13'den TEJ'nin termal iletkenliği belirlenir [10].

### 1.3. Hava Soğutmalı TEJ Modüllerin Egzoz Sisteminde Kullanımı

1988 yılında Birkholz, Porsche firmasının desteklediği bir projede otomobillerde ilk TEJ uygulamasını gerçekleştirmiştir [11]. Bu uygulamada sıcak tarafı karbon çeliği ve soğuk tarafı alüminyumdan imal edilen ısı değiştiriciler arasında demir esaslı ( $FeSi_2$ ) termoelektrik malzemelerden yapılan bir egzoz gazı geri kazanım sistemi oluşturulmuştur.  $FeSi_2$  malzemeden imal edilen TEJ modülün her biri 1 W elektrik gücü üretmektedir. Bu sistem Haidar ve Ghojel tarafından Porsche 944 egzoz sisteminde kullanılmış ve 10 W elektrik gücü elde etmiştir.

Bass ve diğerleri [12-16] 72 adet TEJ kullanarak dizel kamyonlarda egzoz gazı geri kazanımı konusunda çalışmalar yapmıştır. Tasarlanan sistem 230 °C sıcak bölge ve 30 °C soğuk bölge sıcaklığında % 4,5 enerji dönüşüm verimi ve 1 kW elektrik gücü elde etmiştir. Sistem sonraki yıllarda bazı askeri dizel araçlarda kullanılmıştır.

Kobayashi ve diğerleri [17] 3000 cc bir benzinli motor üzerinde 72 adet SiGe TEJ kullanmıştır. Dikdörtgen kesitli bir egzoz borusu zerine TEJ'ler yerleştirilmiştir. TEJ'lerin soğuk bölgesinin soğutulması için aracın soğutma suyu kullanılmıştır. Bu sistem 60 km/h taşıt hızında 1141 °C egzoz sıcaklığı, 563 °C sıcaklık farkında her bir TEJ için 1,2 W elektrik gücü, 0,7 V gerilim ve % 0,9 enerji dönüşüm verimi elde etmiştir.

Ikoma ve diğerleri  $Bi_2Te_3$  esaslı HZ-14s TEJ modülleri benzinli bir motor üzerinde uygulamıştır. TEJ'lerden 60 km/h taşıt hızında 193 W elektrik gücü ve % 2,9 enerji dönüşüm verimi elde edilmiştir [18].

Thacter ve diğerleri HZ-20s ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) termoelektrik modüllerini dizel kamyonet motorlarında egzoz gazı geri kazanımı için kullanmışlardır. Deneysel sonuçlar motor devrinin artmasıyla birlikte TEJ'lerin ürettiği elektriksel gücün arttığını ve sistemin 330 W elektrik gücü ürettiğini göstermiştir [19-21].

Hsiao et al. [22] radyatör ve egzoz sistemi üzerinde TEJ kullanımı konusunda matematik modelleri kurmuş ve deneysel çalışmalar yapmıştır. TEJ 'lerin radyatörler yerine egzoz sisteminde kullanımının daha başarılı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Kullanılan TEJ modülün davranışlarını tahmin için tek boyutlu bir termal direnç modeli oluşturmuş ve sonuçlar deneylerle doğrulanmıştır. Modülden üretilen maksimum güç  $290\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklık farkı ile  $51,13\text{ mW/cm}^2$ 'dir.

Otomobillerin egzozdan ürettiği atık ısılar TEJ'lerin kullanılabilirdiği yüksek güç üretimiyle sonuçlanan önemli ısı kaynaklarıdır [23].

1998 yılında Nissan ilk TEJ kullanan otomobili üretmiştir. Otomobilde kullanılan TEJ Si-Ge yarı iletken elementlerinden imal edilmiş olup 72 çiftten oluşmakta,  $563\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklık farkı için  $35,6\text{ W}$  güç üretmektedir. Sistemin toplam verimi % 0,1 olarak ölçülmüş olup verimin % 2,5'e yükseltilmesi durumunda  $950\text{ W}$  güç üretimi yapabilecektir.

2001 yılında Hi-Z firması 72 yarı iletken çiftten oluşan HZ-14 TEJ modülünü 300 HP maksimum güç üreten içten yanmalı bir motorda egzoz gazı geri kazanımı için kullanmıştır. Motorun maksimum gücünü elde ettiği devir sayısında HZ-14 TEJ modüller ortalama modül başına  $12,5\text{ W}$  güç üreterek toplamda  $900\text{ W}$ 'ın üzerinde elektriksel güç elde etmiştir [24-25].  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  yarı iletken kullanan HZ-14 TEJ modüllerin teorik verimleri % 5'tir. Üretici firmanın pratik uygulamalar için verim hedefi % 20'dir. Firmanın % 20 modül verimine ulaşması durumunda araçta kullanılacak  $1\text{ kW}$ 'lık TEJ ünite yakıt tüketimini % 12-30 arasında azaltacaktır [26].

BMW firması TEJ'lerin kullanımı konusunda ilk olarak 2007 yılında çalışmalara başlamıştır. İlk üretilen sistemler nispeten düşük güç tüketimine sahip olan, maksimum  $200\text{ W}$  elektrik gücü üreten geri kazanım sistemleridir. Bu sisteme sahip araçlar ilk olarak 2008 yılında satışa sunulmuştur. TEJ'lerin gün geçtikçe boyutlarının ve ağırlıklarının azaltılması, yeni yarı iletken malzemelerin kullanılmaya başlaması sonrasında egzoz sistemi içerisinde  $600\text{ W}$  elektrik gücü üreten araçların üretilmesi mümkün olmuştur. 2009 yılında BMW grubu yeni bir TEJ kullanımı projesi açıklamıştır. Bu sistemde TEJ'ler doğrudan monte etmek yerine aracın altında EGR radyatörü içerisine komple bir dönüştürme sistemi olarak yerleştirilmişlerdir. Sistem test sonuçlarına göre  $250\text{ W}$  elektrik gücü üretmiş,  $\text{CO}_2$  ve yakıt tüketimini % 2 azaltmıştır.



Şekil 2. TEJ atık ısı geri kazanımının Ford Fusion 3.0L-V6 modelinde örnek bir uygulaması

Atık ısı geri kazanım sistemleri Ford firmasının da üzerinde çalıştığı konulardan biridir. Şirket aynı zamanda TEJ üretimi yapmaktadır. Ford firması atık ısılarından elektrik gücü üretmek için Half Heusler ve  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  yarı iletken elemanları kullanarak 500W elektrik gücü üretebilecek bir geri kazanım sistemi imal etmiştir.

Bu sistem 3.0L 6V Ford Fusion model taşıtta uygulanmıştır. Ford göre bu sistem taşıtların mevcut sistemleri üzerine yeni sistemlerin entegrasyonunun başarısını gösteren önemli bir örnektir. Ancak sistemin performans, ısı yönetimi, sistem entegrasyonu, üretim ve dayanıklılık alanlarında hala önemli araştırma ve yatırım maliyetlerine gereksinimi bulunmaktadır.

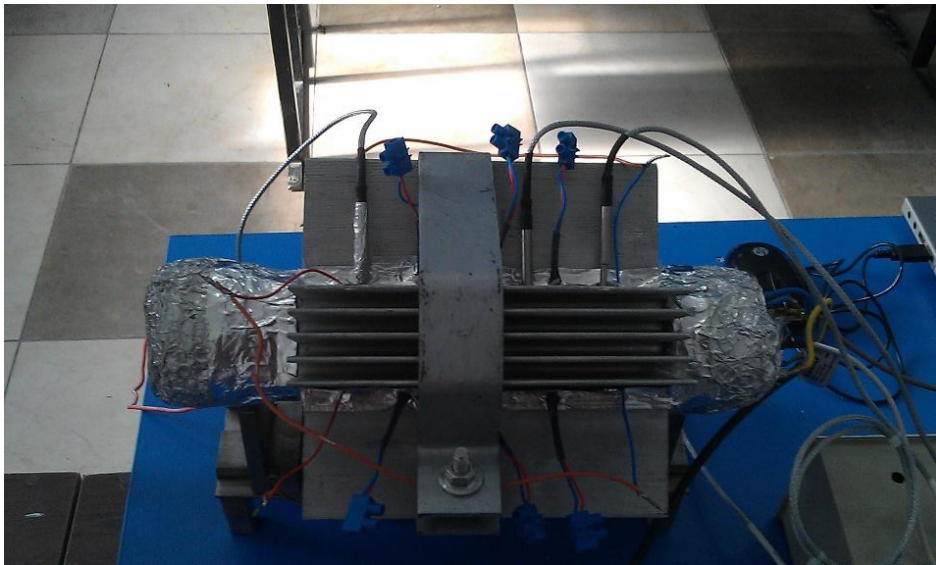
ABD Enerji Bakanlığı, TEJ'lerin araçlar üzerine entegrasyonu ve % 10 yakıt tüketiminde azalma hedefi doğrultusunda (BMW X6, Ford Fusion ve Chevrolet Suburban gibi çalışma dahil) çeşitli projeleri desteklemektedir.

Renault Trucks, 8 ortaklı, kısmen Fransız Hükümeti tarafından finanse edilen € 4.2 milyon bütçeli ve 3 yıl süreli RENOTER isimli bir atık ısı geri kazanım projesi başlatmıştır. Projenin hedefi farklı araç türleri için farklı miktarda atık ısının geri kazanımıdır:

- 200-300W Binek tipi dizel otomobiller için
- 500W Binek tipi benzinli otomobiller için
- 1000W Ağır hizmet kamyonları için

Projenin hedeflerinden birisi de birim güç başına enerji maliyetini 0.3-1.3 \$/W aralığında gerçekleştirerek termoelektrik malzemelerin düşük maliyetli, kolay ulaşılabilir ve verimli atık ısı geri kazanım araçları olduğunu göstermektedir.

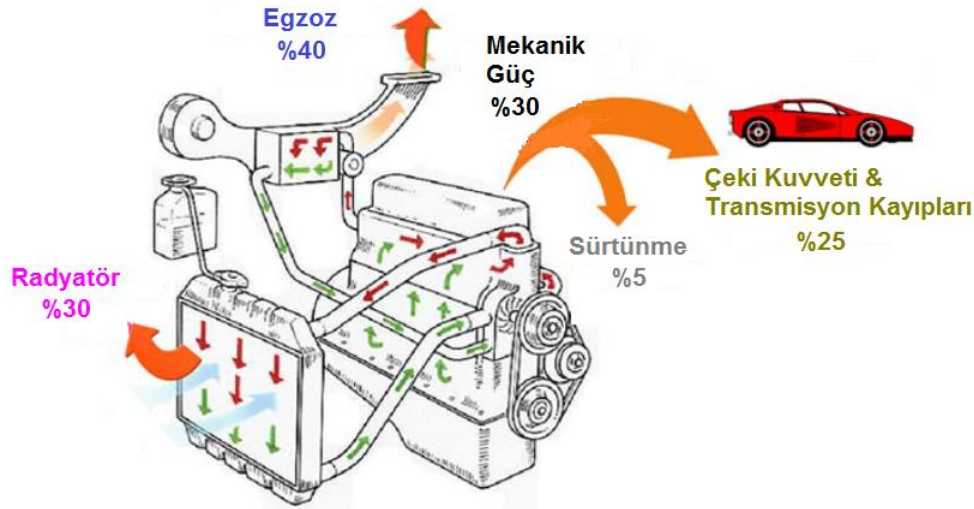
Egzoz atık ısı geri kazanımı konusunda ülkemizde Kunt, M.A. ve Güneş, H.'nin çalışmaları bulunmaktadır. Araştırmacılar içten yanmalı motorların egzoz sistemlerinde atık ısının geri kazanımında kullanılacak hava soğutmalı bir termoelektrik jeneratör sistemi tasarlanmış ve farklı yük dirençlerinde performans deneyleri yapılmıştır. Teorik ve deneysel sonuçlar mukayese edilmiştir. Tasarlanan sistemden  $T_c=313\text{ K}$ ,  $\Delta T=210\text{ K}$ ,  $R_L=125\ \Omega$  yük direncinde maksimum 16,2 V gerilim ve 0,27 A akım elde edilmiştir [27].



Şekil 3. M.A. Kunt'un hava soğutmalı atık ısı geri kazanım sistemi

#### 1.4. Sıvı Soğutmalı TEJ Modüllerin Egzoz Sisteminde Kullanımı

Atık ısılardan geri kazanımı konusunda yapılan bazı çalışmalarda egzoz gazı ısısından faydalanılarak taşıtın yakıt ekonomisinin %20 arttırılabildiği, bu enerjinin %10'luk bir kısmının ise elektrik enerjisine dönüştürülebildiği görülmüştür [28-32].



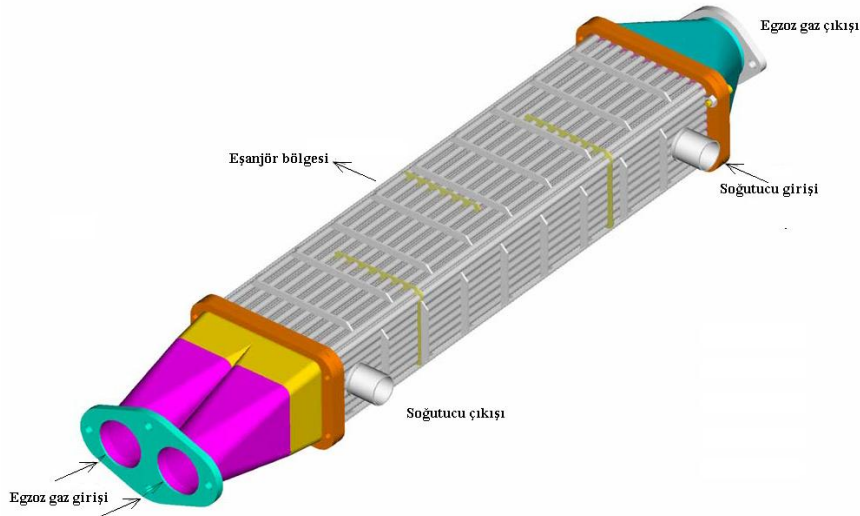
Şekil 4. İçten yanmalı motorlarda enerji dağılımı

Literatürlere göre soğutma sisteminde atık ısı geri kazanımında kullanılan TE malzeme, sistemin boyutu ve çalışma koşulları türüne bağlı olarak, enerji üretimi miktarı farklılık göstermektedir. Hi-Z Technology, Inc. dış yüzeyinde TEJ'ler monte edilmiş, iç kısmında alüminyum soğutucu kullanan su soğutmalı sekizgen çelik döküm ısı eşanjörü kullanmıştır. Üretici firma 72 adet HZ-13 Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> modüllerini kullanarak, 1700 d/d motor hızında 300HP güç üreten bir Cummins NTC 350 dizel motordan 1 kW elektrik gücü elde etmiştir. 2001 yılında, yol testi sırasında mekanik sorunları çözmek için, HZ-14 modülleri imal edilmiştir. HZ-14 modülleri kullanılarak 2100 d/d'da 290 HP güç üreten bir Cummins 335 dizel motorundan maksimum 900W elektrik gücü elde edilmiştir [33]. Crane ve Lagrandeur [34] çeşitli çalışma sıcaklığı aralığı için en uygun termoelektrik malzemelerden tek katmanlı, yüksek sıcaklık dayanımı olan TEJ imal etmişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda 25 °C'de ve 10 lpm bir akış hızında soğutma sıvısı kullanılarak 600 °C egzoz sıcaklığı ve 45 cfm akış oranından 125W elektrik gücü elde edilmiştir.

Karri ve diğerleri 16 adet Si/SiGe malzemelerden yapılan TEJ modüllerini kullanarak spor otomobillerin atık ısı geri kazanımlarını incelemiştir. Taşıtın soğutma sisteminde kullandığı soğutucu akışkan TEJ sisteminin soğutulmasında da kullanılmıştır. Yapılan performans deneyleri sonucu bu sistemden soğutucu-pompalama gücü kaybı, blow-down güç kaybı gibi kayıplar dikkate alındıktan sonra 112.7 km/h araç hızında yaklaşık 450 W elektrik gücü ve % 1.5 yakıt tasarrufu elde edilmiştir [35].

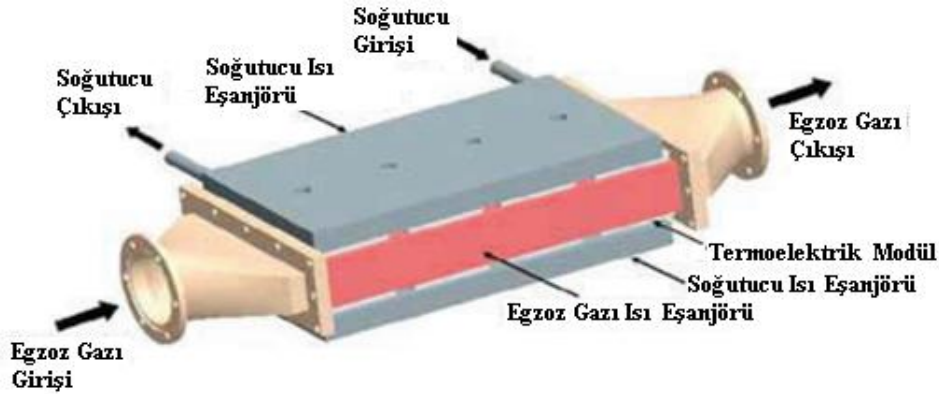
Lagrandeur; egzoz sisteminde üretilen elektriğin yakıt etkinliği üzerindeki etkisini araştırmıştır. Motor egzoz gazları katalitik konvertörden akış yönünde ısı değiştirici tarafından dışarıya atılır. Atılan gazlar farklı debilerde ısı değiştirici ile TEJ' in sıcak tarafı arasında çalışan akışkan pompa tarafından yönlendirilir. TEJ elektrik gücü güç düzenleme sistemi (PCS) de uygun DC/DC dönüştürücü üzerinden araca bağlanır. TEJ de üretilen gücün kullanılması sonucu yakıt verimliliği artar. Bu sistemde kullanılan modül Skutterudites denilen PbTe ve BiTe bileşikli yapıdan meydana gelir. Bu sistem egzoz gazlarının ve soğutucu akışkanın belirli bir sıcaklık ve debi değerinde olmasına ihtiyaç duymaktadır. Bu çalışmada elektrik çıkış gücü hesaplamaları yapılmış ayrıca alternatör yükününün azalması sonucu taşıtın yakıt tüketiminin azaldığı ifade edilmiştir. Burada egzoz gazlarının akışından termal enerjinin oluşmasını sağlayan bileşen The Primary Exchanger

(PHX) olarak adlandırılır. Bu sistemde TEJ modüllerin 200 °C sıcaklık ve 17 bar gaz basıncına dayanıklı olabilmesi istenmiştir. [36].



Şekil 5. Lagrandeu'nun sıvı soğutmalı atık ısı geri kazanım sistemi

Hi-Z teknoloji ile ortaklaşa çalışan Clarkson Üniversitesi küçük vasıtalar için TEJ sistemi tamamlanarak test etmiştir. Bizmut ve tellürün farklı kompozisyonlarından oluşan yarı iletkenler, seramik yapı ve termokupllar sistemin temel elemanlarını oluşturmaktadır. Bu araştırma projesinin birinci safhasında kamyonet tipi araçlar için TEJ sisteminin tasarımı ve teknik özellikleri geliştirilmiştir. Isı değiştiriciler ile birlikte genel sistem performansını tahmin etmek ve analizleri karşılaştırmak için geliştirilmiş bilgisayar modelleri yapılmıştır. Bir yüzeyden diğer yüzeye ısının taşınması için kullanılan soğutucu sistemin prototip yapısı şekildeki gibidir [37].

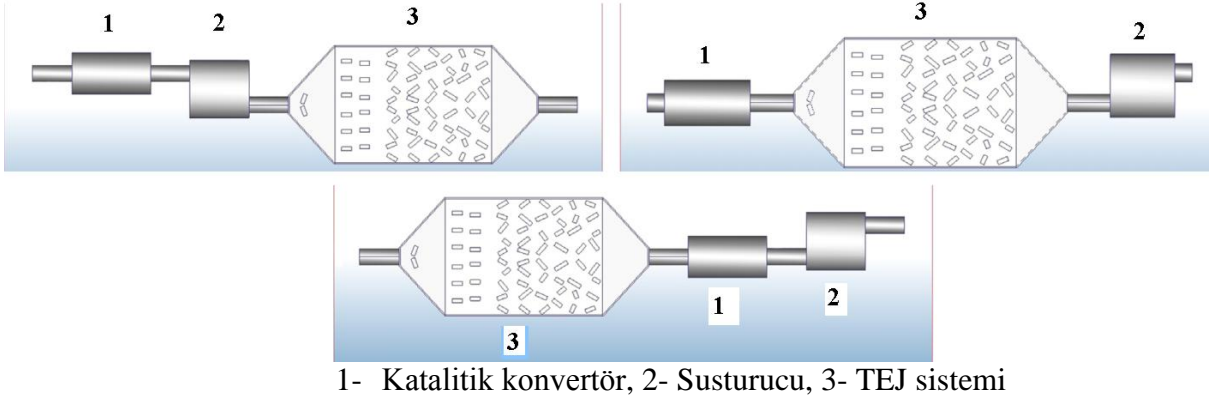


Şekil 6. Clarkson Üniversitesinin tasarladığı sıvı soğutmalı atık ısı geri kazanım sisteminin prototip yapısı

### 1.5. TEJ Atık Isı Geri Kazanım Sistemlerinin Araç Egzoz Hattına Konumlandırılması

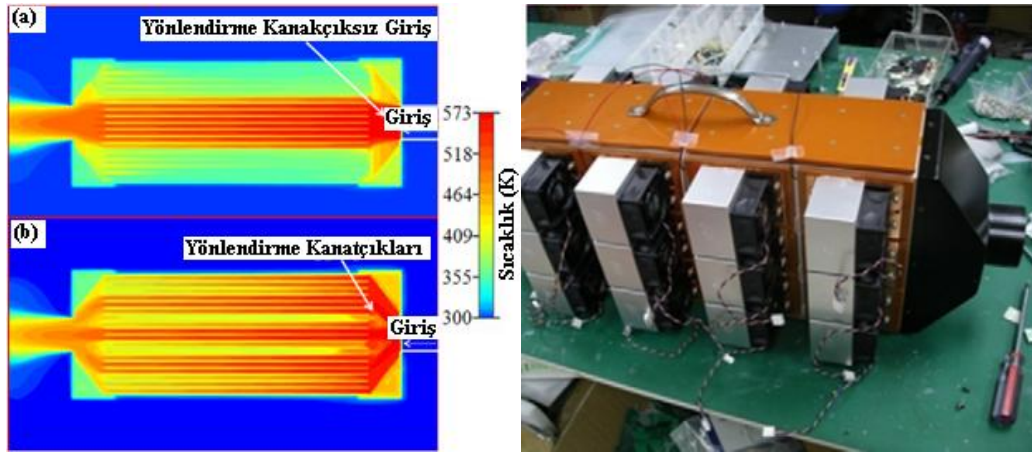
TEJ sisteminin egzoz sistemi üzerindeki konumu da motor performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Liu, X. ve arkadaşları TEJ sisteminin egzoz üzerindeki optimum montaj konumunu incelemiştir. Çalışmada TEJ sistemi egzoz sistemi üzerinde 3 farklı konuma (Susturucudan sonra, katalitik konvertör ile susturucu arasına ve katalitik konvertör ile egzoz manifoldu arasına) yerleştirilerek performans deneyleri yapılmıştır. Deneysel ve simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. TEJ sisteminin susturucu ve katalitik konvertör arasına yerleştirilmesi durumunda en düşük seviyede egzoz geri basıncının olduğu, en yüksek dönüşüm veriminin ve yüzey sıcaklığının elde edildiği ifade edilmiştir [38].





Şekil 7. TEJ sisteminin egzoz sistemi üzerindeki montaj konumları

Cheng-Ting Hsu ve arkadaşları otomobil egzoz sistemlerinde kullanılmak üzere hava soğutmalı, 24 adet TEJ kullanan bir egzoz atık ısı geri kazanım sistemi tasarlamıştır. Sistem, egzoz sisteminin orta kısmına monte edilmiştir. Çalışmada sıcaklık farkının açık devre geriliminin ve maksimum güç çıkışının temel parametresi olduğu ifade edilmiştir. Geri kazanım sisteminin içerisine egzoz gazının kademeli genişlemesini sağlayan eğimli kanatçıklar yerleştirilmiştir. Eğimli yönlendirme kanatçıklarının kullanımı ısıyı daha üniform yaydığından sistem verimini artırmıştır [39].



Şekil 8. Cheng-Ting Hsu'nun hava soğutmalı atık ısı geri kazanım sistemi

Yuchao Wang ve arkadaşları TEJ geri kazanım sistemlerinin otomobil egzoz sisteminde kullanımı konusunda matematiksel bir model oluşturmuşlardır. Çalışma soğutucu akışkan olarak hava ve radyatör soğutma suyu esas alınarak yapılmıştır. Egzoz akışkan miktarı, sıcaklığı, soğutucu akışkan türü, konveksiyon ısı transfer katsayısı, PN yarı iletken yüksekliği ve  $R_L/R_I$  oranının TEJ geri kazanım sisteminin çıkış gücü ve verimine etki eden en önemli faktörler olduğu ifade edilmiştir [40].

Robert J. Stevens ve arkadaşları [41] egzoz gazlarından elde edilen termoelektrik gücün teorik sınırlarını araştırmışlardır. Teorik sınırlar bir hesaplanabilir düşük yük modelinden elde edilmiştir. Çalışma daha büyük sistemlerin optimizasyonu için de kullanılabilir. Teorik sınır modelinden elde edilen sonuçlar, konu ile ilgili diğer optimizasyon yaklaşımlarıyla mukayese edilmiştir [42-51]. Modele göre TEJ'in figure of Merit (ZT) değeri sistemin verimini karakterize etmek için yeterli değildir. Ayrıca bu model TEJ'lerin karakterizasyonu konusunda karmaşık olmayan, özel tasarımlarda kolaylıkla uygulanabilen, düşük maliyetli bir çözüm getirmiştir.

## 2. Sonuç

Termoelektrik güç üretimi ısı enerjisinin elektrik enerjisine dönüşme şeklidir. Başka bir deyişle bir yarı iletkenin sıcak ve soğuk yüzeyleri arasında meydana gelen sıcaklığa bağlı olarak kaynaklanan ısının elektrik enerjisine dönüşümüdür. Termoelektrik üretim son derecede temiz ve güvenilir bir enerji kaynağıdır. Termoelektrik enerji teknolojilerin içten yanmalı motorlarda kullanımı; taşıt veriminin artması, yakıt tüketiminin ve alternatör boyutlarının azaltılmasına imkan sağlayacaktır. Taşıtlarda kullanılan geri kazanımın hava ya da sıvı soğutmalı çeşitleri bulunmaktadır. Mevcut TEJ teknolojilerinin sistem verimi düşüktür, ancak yüzeyler arası ısı geçişinin azaltılması, sıcak yüzeyin ısı kaybının düşürülmesi, soğuk yüzeyin daha iyi soğutulması gibi yapılacak bazı iyileştirmelerle etkinlik daha da arttırılabilir. Araç üzerindeki TEJ atık ısı geri kazanım sistemlerinde üretilen elektrik enerjisi motor devri, motor yükü, ateşleme avansı, püskürtme avansı, karışım oranı ve sıkıştırma bağlı olarak değişmektedir. Atık ısının geri kazanımı amaçlı egzoz ve soğutma sisteminde kullanılan TEJ'lerin verimlerinin yükseltilmesi motorlu araçlarda kullanılabilirliğini daha da arttıracaktır.

## Kaynaklar

1. Dalola, S., Ferrari, M., Ferrari, V., Guizetti, M., Marioli, D. ve Taroni, A., Characterization of Thermoelectric Modules Powering Autonomous Sensors, IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement. 2009. **58** (1), p. 99–107.
2. Khattab, N.M. and El Shenawy E.T., Optimal Operation of Thermoelectric Cooler Driven by Solar Thermoelectric Generator, Energy Conversion and Management. 2006. **47** (4): p. 407-426,.
3. Lertsatitthanakorn, C., Electrical Performance Analysis and Economic Evaluation of Combined Biomass Cook Stove Thermoelectric (BITE) Generator, Bioresource Technology, 2007. **98** (8): p. 1670-1674.
4. Ferrari, M., Ferrari, V., Guizetti, M, Marioli, D. and Taroni, A., Characterization of Thermoelectric Modules for Powering Autonomous Sensors, IMTC 2007 Instrumentation and Measurement Technology Conference. 2007. Warsaw, p. 1-6, 1-3 May.
5. Shen, B., Hendry, R., Cancheevaram, J., Watkins, C., Mantini, M. ve Venkatasubramanian, R., DC-DC Converter Suitable for Thermoelectric Generator, XXIV International Conference on Thermoelectrics. 2005. p. 529-531, 19-23 June.
6. J.G. Haidar and J.I. Ghojel. Waste heat recovery from the exhaust of low-power Diesel engine using fabrication and evaluation of SiGe/electrode. Proc. 16th International Conference on Thermoelectrics. 1997. Dresden, Germany. p. 599-602.
7. Vazquez J, Sanz-Bobi M, Palacios R, et al. State of the art of thermoelectric generators based on heat recovered from the exhaust gases of automobiles. In: Proceedings of the seventh European workshop on thermoelectrics; 2002.
8. Lertsatitthanakorn, C., Electrical Performance Analysis and Economic Evaluation of Combined Biomass Cook Stove Thermoelectric (BITE) Generator, Bioresource Technology. 2007. **98**: (8), p. 1670-1674.
9. Ahiska, R. and Dislitas, S., Microcontroller Based Thermoelectric Generator Application, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 2006. **19**: (2), p. 135-141.
10. Tsai, H.L. ve Lin, J.M., Model Building and Simulation of Thermoelectric Module Using Matlab/Simulink, Journal of Electronic Materials. 2009. **39**: (9), p. 2105–2111.
11. Birkholz, U., Grob, E., Stohrer, U., Voss, K., Conversion of waste exhaust heat in automobiles using FeSi<sub>2</sub> thermoelements, Proceedings of the 7th International Conference on Thermoelectric Energy Conversion, Arlington, USA; 1988. p. 124-128.
12. Bass, J.C., Campana, R.J., Elsner, N.B., Thermoelectric generator for diesel engines, Proceedings of the 1990 Coatings for Advanced Heat Engines Workshop, USA.;1990.

13. Bass, J.C., Campana, R.J., Elsner, N.B., Thermoelectric generator for diesel trucks, Proceedings of the 10th International Conference on Thermoelectrics, Cardiff, Wales; 1991.
14. Bass, J.C., Elsner, N.B., Leavitt, A., Performance of the 1 kW thermoelectric generator for diesel engines”, Proceedings of the 13th International Conference on Thermoelectrics. New York; 1995.
15. Bass, J.C., Thermoelectric generator for motor vehicle, U.S. Patent US5625245, 1997. April 29;
16. Bass, J.C., Elsner, N.B., Leavitt, A., Method for fabricating a thermoelectric module with gapless eggcrate, U.S. Patent US5856210, 1999. January 5.
17. Kobayashi, M., Ikoma, K., Furuya, K., Shinohara, K., Takao, H., Miyoshi, M., Imanishi, Y., Watabane, T., Thermoelectric generation and related properties of conventional type module based on Si-Ge alloys, Proceedings of the 15th International Conference on Thermoelectrics; 1998.
18. Ikoma, K., Munkiyo, M., Furuya, K., Kobayashi, M., Komatsu, H., Shinohara, K., Thermoelectric generator for gasoline engine using Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> modules, J. Japan Inst. Met., 1999. **63** (11): p.1475-1478.
19. Thacher, E., Helenbrook, B., Karri, M., Richter, C., Testing of an automobile exhaust thermoelectric generator in a light truck, Proceedings Ins. Mech. Eng. Part D, Automobile eng., 2007. **221** (1): p.95-107.
20. Matsubara, K., The performance of a segmented thermoelectric converter using Yb-based filled skutterudites and Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-based materials”, MRS 2001 Fall Proceedings, Symposium, vol. 691; 2001, G9.1.
21. Matsubara, K., Development of a high efficient thermoelectric stack for a waste exhaust heat recovery, Proceedings of ICT'02, 21st International Conference on thermoelectrics; p. 418-423.
22. Hsiao, Y.Y., Chang, W.C., Chen, S.L., A mathematic model of thermoelectric module with applications on waste heat recovery from automobile engine, Energy. 2010. **35**: p. 1447-1454.
23. Weng, C.C., Huang, M.J., A simulation study of automotive waste heat recovery using thermoelectric power generator, International Journal of Thermal Sciences. 2013. **71**: p. 302-309.
24. Ikoma, K., Munkiyo, M., Furuya, K., Kobayashi, M., Izumi, T., Shinohara, K., Thermoelectric module and generator for gasoline engine vehicles, Proceedings Int. Conf. Thermoelectrics. 1998. p. 464-467.
25. Kushch, A.S., Bass, J.S., Ghamaty, S., Elsner, N.B., Thermoelectric development at Hi-Z technology, Proceedings Int. Conf. Thermoelectrics, 2001. p. 422-430.
26. Yang, J., “Potential applications of thermoelectric waste heat recovery in the automotive industry”, Proceedings Int. Conf. Thermoelectrics, 2005. p. 155-159.
27. Kunt, M.A., Güneş, H., Termoelektrik Jeneratörlerin İçten Yanmalı Motorların Egzoz Sistemlerinde Farklı Yük Dirençlerinde Uygulaması, 13. Uluslararası Yanma Sempozyumu, 9-11 Eylül 2015.
28. Stabler, F., Automotive Applications of High Efficiency Thermoelectrics, Proceedings of DARPA / ONR / DOE High Efficiency Thermoelectric Workshop, 2002. p.1-26.
29. John Fairbanks, DOE's Launch of High-Efficiency Thermoelectrics Projects, DEER Conference 2004.
30. Mitsuo Kadota, and K. Yamamoto Advanced Transient Simulation on Hybrid Vehicle Using Rankine Cycle System, SAE international 2008. April, 200801-0310
31. L. Bell, Cooling, Heating, Generating Power, and Recovering Waste Heat with Thermoelectric Systems, Science. 2008. Sep., **321**: p 1457-1461.
32. Bass, J.C., Elsner, N.B., Leavitt, F.A., Performance of the 1 kW thermoelectric generator for diesel engines, Hi-Z Technology, Inc., 1994.
33. Kushch, A.S., Bass, J.C., Ghamaty, S., Elsner, N.B., Thermoelectric development at Hi-Z technology, Proceedings of the 20th International Conference on Thermoelectrics, Beijing, China, 2001. p. 422-430.

34. Crane, D.T.; Lagrandeur, J.W., Progress report on BSST-led US department of energy automotive waste heat recovery program, *J. Electron. Mater.* 2010. **(39)**: p. 2142-2148.
35. Karri, M.A., Thacher, E.F., Helenbrook, B.T., Exhaust energy conversion by thermoelectric generator: two case studies, *Energy Convers. Manage.*, 2011. **(52)**: p. 1596-1611.
36. J. Lagrandeur. Automotive Waste Heat Conversion To Electric Power Using Skutterudite, Tags, Pbte And Bite, *Thermoelectrics*, 2006. Ict '06. 25th International Conference On, 2006. p. 343–348.
37. Aleksandr S. Kushch, John C. Bass, Saeid Ghamaty and Norbert B. Elsner, *Thermoelectric Development At Hi-Z Technology, Paccar Technical Center.*
38. Liu, X., Deng, Y.D., Chen, S., Wang, W.S., Xu, Y., Su, C.Q., A case study on compatibility of automotive exhaust thermoelectric generation system, catalytic converter and muffler, *Case Studies in Thermal Engineering*, 2014. **(2)**: p.62–66.
39. Hsu, C., Huang, G., Chu, H., Yu, B., Yao, D., Experiments and simulations on low-temperature waste heat harvesting system by thermoelectric power generators, *Applied Energy*. 2011. **(88)**: p. 1291-1297.
40. Wang, Y., Dai, C., Wang, S., Theoretical analysis of a thermoelectric generator using exhaust gas of vehicles as heat source, *Applied Energy*. 2013. **(112)**: p. 1171–1180.
41. Stevens, R.J., Weinstein, S.J., Koppula, K.S., Theoretical limits of thermoelectric power generation from exhaust gases, *Applied Energy*. 2014. **(133)**: p.80–88.
42. Gao, X, Andreasen, SJ, Chen, M, Kær, S.K., Numerical model of a thermoelectric generator with compact plate-fin heat exchanger for high temperature PEM fuel cell exhaust heat recovery, *Int J Hydrogen Energy*. 2012. **(37)**: p. 8488–90.
43. Zhou, S, Sammakia, B.G, White, B, Borgesen, P., Multiscale modeling of thermoelectric generators for the optimized conversion performance. *Int J Heat Mass Transf.* 2013. **(62)**: p. 435–44.
44. Yu, J, Zhao, H, Jianlin, Y, Hua, Z.A., Numerical model for thermoelectric generator with the parallel-plate heat exchanger, *J Power Sources*. 2007. **(172)**: p. 428–34.
45. Kumar, S, Heister, S.D, Xu, X, Salvado,r J.R, Meisner, G.P., Thermoelectric generators for automotive waste heat recovery systems part ii: parametric evaluation and topological studies, *J Electron Mater.* 2013. **(42)**: p. 944–55.
46. Kumar, S, Heister, S.D, Xu, X, Salvador, J.R, Meisner, G.P., Thermoelectric generators for automotive waste heat recovery systems part I: numerical modeling and baseline model analysis, *J Electron Mater.* 2013. **(42)**: p. 665–74.
47. Crane, D.T., An introduction to system-level, steady-state and transient modeling and optimization of high-power-density thermoelectric generator devices made of segmented thermoelectric elements, *J Electron Mater.* 2010. **(40)**: p. 561–9.
48. Wang, Y, Dai, C, Wang, S., Theoretical analysis of a thermoelectric generator using exhaust gas of vehicles as heat source, *Applied Energy*. 2013. **(112)**: p. 1–10.
49. Liang, G, Zhou, J, Huang, X., Analytical model of parallel thermoelectric generator, *Applied Energy*. 2011. **(88)**: p. 5193–9.
50. Min, G, Rowe, D.M., Conversion efficiency of thermoelectric combustion systems, *Energy Convers IEEE Trans.* 2007 **(22)**: p. 528–34.
51. Ioffe, A.F., *Semiconductor thermoelements and thermoelectric cooling.* London: Infosearch”, 1957.