



Mühendis ve Makina / Engineer and Machinery
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/muhendismakina>



ÖZGÜN TİP SERBEST PİSTON LINEER GENLEŞTİRİCİNİN DENEYSEL PERFORMANS ANALİZİ

***Furkan KODAKOĞLU:**

Baykar Teknoloji, 34488, İstanbul, Türkiye

e-posta : kodakoglufurkan@gmail.com, ORCID No : <https://orcid.org/0000-0003-1462-9224>

John NUSZKOWSKI:

University of North Florida, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 32224,
Jacksonville, Florida, ABD

e-posta : john.nuszkowski@unf.edu, ORCID No : <http://orcid.org/0000-0003-1198-1038>

Anahtar Kelimeler

Öz

*Vanasız Serbest Piston;
Lineer Genleştirici; De-
neysel Performans Ana-
lizisi; Düşük Sıcaklıklı Isı
Geri Kazanımı.*

Bu çalışmanın amacı, bir Vanasız Serbest Piston Lineer Genleştirici'nin (SPLG) uzun süreli sürekli rejim çalışmasını elde etmektir. Giriş ve çıkış sıcaklıklarını, giriş ve çıkış basınçlarını, debiyi ve voltaj çıkışını ölçmek için bir deneysel test düzeneği kurulmuştur. Frekans, voltaj ortalama karekök değeri, hacimsel verim, elektrik-mekanik dönüşüm verimi, izantropik verim, tersinmezlik, gerçek genleştirici gücü ve elektrik gücü gibi birçok çıktı parametrelerinin eğilimleri sunulmuştur. SPLG'nin bu ilk çalışmasında, 44 Hz maksimum genleştirici frekansı ve %21,5 maksimum izantropik verim elde edilmiştir.

* kodakoglufurkan@gmail.com
doi : 10.46399/muhendismakina.1628149

EXPERIMENTAL PERFORMANCE ANALYSIS OF A NOVEL TYPE FREE PISTON LINEAR EXPANDER

Keywords

*Valveless Free Piston;
Linear Expander; Expe-
rimental Performance
Analysis; Low Tempera-
ture Heat Recovery.*

Abstract

The objective of this work was to achieve long-term steady state operation of a Valveless Free-Piston Linear Expander (FPLE). An experimental test bench was developed to measure the inlet and outlet temperatures, inlet and outlet pressures, flow rate, and voltage output. The trends of several output parameters such as frequency, average root mean square (RMS) voltage, volumetric efficiency, electrical-mechanical conversion efficiency, isentropic efficiency, irreversibility, actual expander work, and electrical power were presented. In this first iteration, FPLE achieved a maximum expander frequency of 44 Hz and a maximum isentropic efficiency of 21.5%.

Araştırma Makalesi

Research Article

Başvuru Tarihi : 27.01.2025

Submission Date : 05.03.2025

Kabul Tarihi : 24.03.2025

Accepted Date : 25.04.2025

Extended Abstract

Introduction

Increasing demand for fossil fuel consumption in order to generate electricity suggests researchers to further develop current energy generation technologies. In this regard, efficiencies of the current thermodynamic cycle designs also need to be improved so that the dependence on the fossil fuels can be decreased. Low temperature heat recovery, in this case, has the potential to utilize the waste energy, thereby increasing the efficiency of the cycles and helping to reduce air pollution.

The purpose of this work was to investigate the potential of a new type of expander called Free-Piston Linear Expander (FPLE). It was also of interest to this work to design and build the FPLE to analyze the feasibility of the expander for advanced low temperature heat recovery systems. The configuration of FPLE involves several advantages over conventional expansion machines, such as compact and simple design, low manufacturing cost, good operational flexibility, and high efficiency. Friction and leakage are assumed to be prominent factors on its performance. Another contribution to performance losses is a possible heat loss which can be minimized with proper insulation techniques. In addition, structural balancing is required to prevent excessive vibrations. Many studies have been observed on conventional expansion machines in the literature. Although the FPLE has a simple design and low manufacturing cost, a limited number of experimental studies on this expander exists in the literature. For this reason, this study aims to develop a FPLE to investigate its performance for use in low temperature energy recovery systems.

Objectives

The objective of this work was to investigate the performance of the FPLE and to analyze its viability for low temperature heat recovery systems. Heat sources such as waste energy, solar power, and geothermal energy can be utilized to drive the selected expander. Currently, a limited number of experimental studies of the FPLE were found in the literature. For this reason, primary attention was focused on the initial operation of the FPLE. For this study, the testing was performed at the University of North Florida's College of Computing, Engineering & Construction's Mechanical Engineering Energy Efficiency Laboratory by using the air as the working fluid provided by means of a compressor. In order to analyze the performance of the FPLE and to compare it with other expander types in the literature, a test bench was developed with measurement devices such as pressure and temperature sensors, LabJack U12, and flow rate meter. The schematic of the testing configuration and a brief explanation of the expander design, equipment, measurement devices, and the method of thermodynamic analysis are presented.

Methods

A test bench was developed with measurement devices such as pressure and temperature sensors, data acquisition system, and a flow rate meter in order to analyze the performance of the FPLE and to compare it with other expander types in the literature. The air was chosen as the working fluid and supplied by

means of a compressor. The in-line air heater was used to heat the air before entering to the FPLE. The cylinder vessel and the inlet air pipeline were insulated with a fiberglass insulation material. A resistor bank was established in the experimental setup in order to apply an external load to the FPLE.

The FPLE design, analyzed in this study, consists of a piston with two chambers and a cylinder with four ports, two of which are intake ports and the others are exhaust ports. The cylinder housing has an electric coil. Two chambers of the piston are connected to each other with a rod, to which permanent magnets are coupled.

K-type thermocouples were used to measure the temperatures of the inlet air and the inlet and outlet temperatures of the FPLE's chambers with an accuracy of 2.2 °C. Four gauge pressure sensors with an accuracy of 2.5% of full scale were attached to the inlet and outlet ports of both chambers of the FPLE. The chamber thermocouples and pressure sensors were connected to the data acquisition device and the software was used to display and record the temperature/pressure values. A panel-mount flow meter was used to measure the flow rate entering and exiting the expander with an accuracy of 3.0% of full scale. Another data acquisition device was connected to the electrical circuit of the FPLE to display and measure the voltage outputs during operation. The frequency accuracy is the ratio of the scan rate (Hz) to the number of scans during voltage recordings.

The analysis was carried out by using the first and second laws of thermodynamics. The cylinder vessel of the FPLE was taken as the control volume for the analysis, which has two inlets and outlets.

This study complied with research and publication ethics.

Results and Discussions

The long-term steady state operation of the valveless FPLE was successfully achieved. Three different sets of experiments were performed in order to analyze the performance of the FPLE with varying inlet air pressure, inlet air temperature, and resistance magnitude.

The frequency output of the FPLE had a tendency to increase as the inlet air pressure increased while increasing the inlet air temperature resulted in the decrease of the frequency. The maximum frequency in all the experiments was achieved as 44.0 Hz. The FPLE produced the maximum average RMS voltage of 2.32 V. It can be anticipated from the trends that the voltage is likely to increase at even higher inlet air pressures and resistance magnitudes with an optimum inlet air temperature of 60 °C.

The results showed that the maximum isentropic efficiency of the FPLE was achieved as 21.5%, producing maximum actual expander work and maximum electrical power of 75.1 W and 3.30 W, respectively. The mechanical-electrical conversion efficiency results ranged between 0.1%-7.1%, clearly indicating the cause of the large differences between the actual expander work and the electrical power output.

It should be noted this was the first iteration of this valveless FPLE design. For future studies, O-ring material is recommended to be improved in order to provi-

de better sealing and reducing the friction between O-rings and the cylinder wall. Furthermore, mechanical-electrical conversion mechanism should be improved in order to reduce the difference between the actual expander work output and the electrical power produced. Therefore, further research can be conducted on the magnet selection, coil wiring, and the electrical circuit design.

1. Giriş

Mevcut küresel eğilimler 2035 yılına kadar fosil yakıtlar için olan talebin artacağını açıkça göstermektedir (International Energy Agency, 2013). Bu yükseliş mühendisleri mevcut enerji üretim teknolojilerini daha da geliştirmeleri yönünde zorlamaktadır. Bu bağlamda, mevcut termodinamik çevrim tasarımlarının verimleri ayrıca geliştirilmelidir ki fosil yakıtlara olan bağımlılık azalabilsin. Düşük sıcaklıklı ısı geri kazanımı, bu durumda, atık ısıyı kullanabilme potansiyeline sahiptir. Böylece çevrimlerin verimleri arttırılabilir ve hava kirliliğini azaltmada katkı sağlayabilir.

Organik Rankine Çevrimi (ORÇ), düşük sıcaklıklı ısı kaynaklarından elektrik üretmek için kullanılan en yaygın çevrimdir (Li ve diğ., 2023; Braimakis, 2024). Bu ısı kaynakları atık ısıya (Stainchaouer, Schiffelechner, Wieland, Sakalis ve Spliethoff, 2024; Yan, Liu, Ying ve Zhang, 2023; Aliahmadi, Moosavi ve Sadrhosseini, 2021; Wang ve diğ., 2024), güneş gücüne (Xu, Zhang, Zhang, Ma ve Sambatmaryde, 2024; Fatigati, Bartolomeo ve Cipollone, 2024), jeotermal güce (Pambudi, Wibowo, Ranto ve Saw 2021), ve biyokütle gücüne (Permana, Fagioli, Lucia, Rusirawan ve Farkas, 2024) dayalı olabilir. ORÇ'nin önemli bir komponenti olarak, genleştiricinin sistemin tüm performansına ve verimine etkisi vardır. Optimum ısı verimliliği elde etmede, en uygun genleştiricinin seçilmesi anahtar bir rol oynar. Genleşme makineleri, genel olarak, tasarımları ve çalışma prensipleri açısından iki ana kategoriye ayrılır. Bu kategoriler dinamik makineler (turbomakineler gibi) ve pozitif yer değiştirme makineleridir (ayrıca hacimsel genleştiriciler olarak da adlandırılır) (Harada, 2010; Yagoub, Doherty ve Riffat, 2006). Türbinler, makine boyu küçüldükçe, verimli çalışmak için çok yüksek hızlarda çalışmayı gerektirir. Ayrıca, ıslak genleşmeye toleransları yoktur ve karmaşık tasarımlara ve yüksek imalat maliyetlerine sahiptirler.

Pozitif yer değiştirme genleştiricileri scroll (Imran, Usman, Park ve Lee, 2016; Mathias, Johnston, Cao, Priedeman ve Christensen; 2009), vidalı (Smith, Stosic ve Kovacevic, 2005; Smith, Stosic ve Kovacevic, 1999; Smith, Stosic, Aldis ve Kovacevic, 2000), döner kanatçıklı (Yang, Peng, He, Guo ve Xing, 2009), gerotor (Mathias, Johnston, Cao, Priedeman ve Christensen; 2009), pistonlu (Glavatskaya, Poddevin, Lemort, Shonda ve Descombes, 2012), döner (yuvarlanan) pistonlu (Hu, Li, Zhao, Xia ve Ma, 2015) ve serbest piston lineer genleştirici çeşitlerini içerir (Wang, Chen, Jia ve Roskilly, 2017; Zhang, Peng, He, Xing ve Shu, 2017; Preetham ve Weiss, 2016; Li ve diğ., 2016). Scroll genleştiriciler, Imran ve diğ. (2016) tarafından gösterildiği gibi, düşük güç uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır ve verimleri %7-85 aralığındadır. Vidalı genleştirici uygulamaları ORÇ, güneş enerjili ORÇ, jeotermal, ve soğutma çevrimlerini kapsamaktadır (Imran ve diğ., 2016). Smith ve diğ. (Smith ve diğ., 1999; 2000; 2005) uzun süreli gelişmeleri ve araştırmaları göstermiştir.

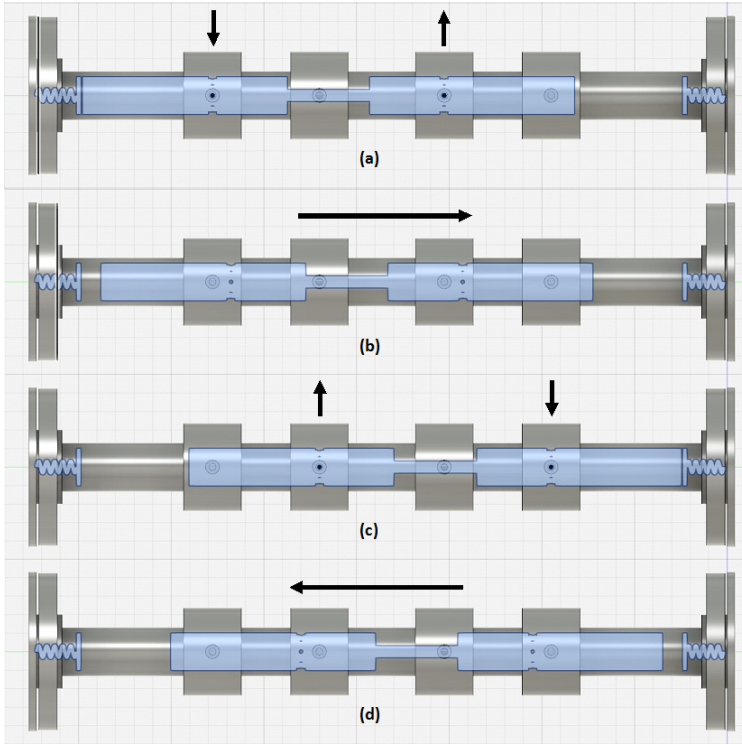
Serbest piston lineer genleştirici (SPLG) ısı enerjisiyi elektrik enerjisine dönüştüren bir pozitif yer değiştirmeli makinedir. Yakın geçmişte araştırmaların bir konusu olmuştur ve literatürde birkaç tasarım alternatifleri sunulmuştur (Zhang ve diğ., 2017; Preetham ve Weiss, 2016; Li ve diğ., 2016; Tian ve diğ., 2017). Gelecekteki tasarımında, SPLG Üst Ölü Noktadan (ÜÖN) Alt Ölü Noktaya (AÖN) meka-

nik bir bağlantı olmadan bir silindir içinde serbestçe hareket eden bir pistondan oluşur. Mekanik bir bağlantının olmaması bu genleştiriciyi tipik pistonlu genleştiricilerden ayırır. Wang ve diğ. (2017) bir lineer elektrik jeneratörüyle birleştirilen çift-pistonlu hava tarafından sürülen serbest piston lineer genleştiricinin deneysel çalışmasını yürütmüştür. Konsept tasarımlarında, sisteme hava girişi ve çıkışı her silindirde bulunan giriş vanası ve elektromanyetik egzoz vanası aracılığıyla sağlanmıştır. Zhang ve diğ. (2017) transkritik CO₂ çevriminin kısma prosesindeki işi geri kazanmak için çift etkili serbest piston genleştirici tasarımı geliştirmişlerdir. Preetham ve Weiss (2016) kayar piston mimarisine dayalı olarak bir küçük ölçekli serbest piston genleştirici tasarlamışlardır ve genleştiricinin düşük sıcaklıklı atık ısı kaynaklarını kullanılabilir güç çıktılarına çevirmede kullanımını incelemişlerdir. Li ve diğ. (2016) özgün bir serbest piston genleştirici ve lineer jeneratör ünitesi kullanarak taşıt motorlarından atık ısıyı geri kazanmayı sunmuşlardır. Tian ve diğ. (2017) serbest piston lineer jeneratörün çalışma karakteristiklerini ve güç çıktılarını araştırmak için deneysel bir çalışma yürütmüştür. Ismael ve diğ. (2021) iki pistonlu lineer jeneratör için test düzeneği geliştirmiştir ve piston hareketinin ürettiği güç, voltaj, frekans ve dönüşüm verimleri gibi parametreleri incelemiştir. Vana zamanlamasını ayarlayarak yapılan araştırmada, %59.9 maksimum verimlilik elde edilirken 120 W'lık güç üretilmiştir. Serbest piston genleştirici jeneratörü için başka bir test düzeneği, Peng, Tong, Guo ve Huo (2021) tarafından çalışılmıştır. Tek pistonlu sistemde yapılan bu çalışmada, farklı genleşme zamanlarında ve tork yüklerinde, genleştiricinin çalışma karakteristiği incelenmiştir. Maksimum 25.8 W'lık güç elde edilmiştir. Wu ve diğ. (2021), basınçlandırılmış havayı kullanarak tek pistonlu serbest piston genleştiricisinin performansını incelenmiştir. Genleştiriciye bağlanan jeneratör aracılığıyla 3 J'luk bir enerji üretimi yapılmıştır. Peng, Tong, Yan ve Huo (2022), diğer bir çalışmada, giriş basıncının ve torkun tek pistonlu serbest piston genleştiricinin performansına etkisi incelenmiştir. Tüm parametrelerin içinde, giriş basıncının etkisinin performansa en büyük etkisi olduğu sonucuna varılmış ve maksimum 28.5 W'lık bir güç üretimi elde edilmiştir.

SPLG için tasarımlardan biri de çift piston yapıları bir serbest piston olarak düşünülmektedir (Wang ve diğ., 2017). Diğer deyişle, piston 2 odaya sahiptir (Bonar, 2002). Bonar tarafından tasarlanan SPLG, diğer tasarımlar gibi giriş ve egzoz portlarının açılmalarını kontrol etmek için kontrol vanaları kullanmamaktadır (Wang ve diğ., 2017; Tian ve diğ., 2017; Bonar, 2002). Bu genleştiricinin en önemli avantajlarından birisi basit tasarımı ve düşük üretim maliyetidir. Giriş ve çıkış portları vanasız olduğundan, genleştirici hareket eden sadece bir parçaya sahiptir, o da pistondur. Bu çalışmanın amacı yeni bir genleştirici tipi olan Vanasız Serbest Piston Lineer Genleştiricinin (SPLG) potansiyelini incelemektir. Gelişmiş düşük sıcaklıklı ısı geri kazanım sistemleri için bu genleştiricinin uygulanabilirliğini analiz etmek için SPLG'yi tasarlamak, üretmek ve deneysel performans analizini yapmak bu çalışmada asli amaç edinilmiştir. SPLG'nin test edilmesi için test düzeneği kurulmuştur. SPLG'nin bu tasarımının literatürdeki diğer tasarımlara göre avantajı vana içeriyor olmaması ve tek hareket eden parçanın piston olmasıdır. Vanasız SPLG tasarımının ilk deneysel sürekli rejim çalışmasının elde edilmesi ve performans analizi bu çalışmanın nihai hedefidir.

2. Deneysel Yöntemler

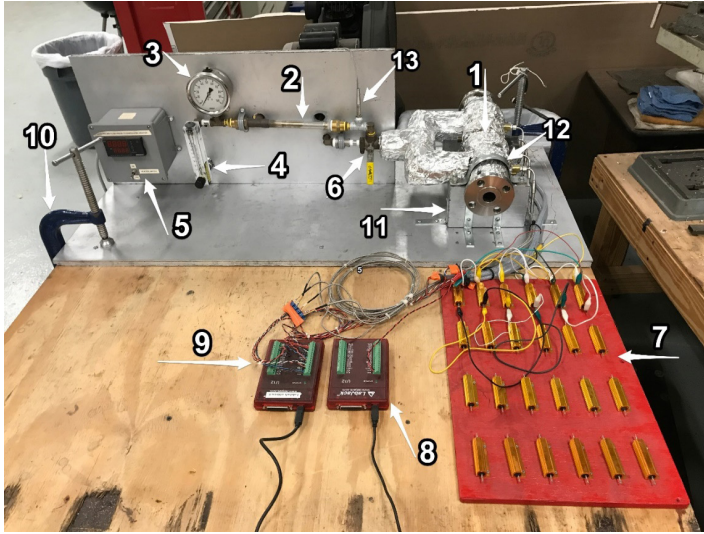
Bu çalışmada analiz edilen SPLG tasarımı iki odalı bir pistondan ve 4 delikli silindirden oluşmaktadır. 2 delik giriş bölmeleri ve geri kalanlar egzoz bölmelerini oluşturur. Silindir gövdesi elektrik sargılarına sahiptir. Pistonun iki odası, üzerine doğal mıknatısların yerleştirildiği bir bağlantı çubuğuyla birbirlerine bağlıdır. Sistemin çalışması krank mili içermeyen bir motorun çalışma prensiplerini andırmaktadır. Pistonun lineer hareketinden elde edilen elektrik gücünü üretme yöntemi, pistona yüklenmiş mıknatıslarla ve silindire sarılan sargılarla sağlanmıştır. Çalışma sürecinde, her odadaki parametreler eş zamanlı olarak değişir ve bir odada sıkışma gerçekleşip diğer odada genleşme oldukça elektrik gücü üretilir. Silindir gövdesinin her iki tarafında bir yay-conta mekanizması kullanılmıştır. Bu mekanizma, pistonun hareket ederken silindir içinde aşırı yer değiştirme yapmasını önler. Çalışma prosesi Şekil 1’de gösterilmiştir.



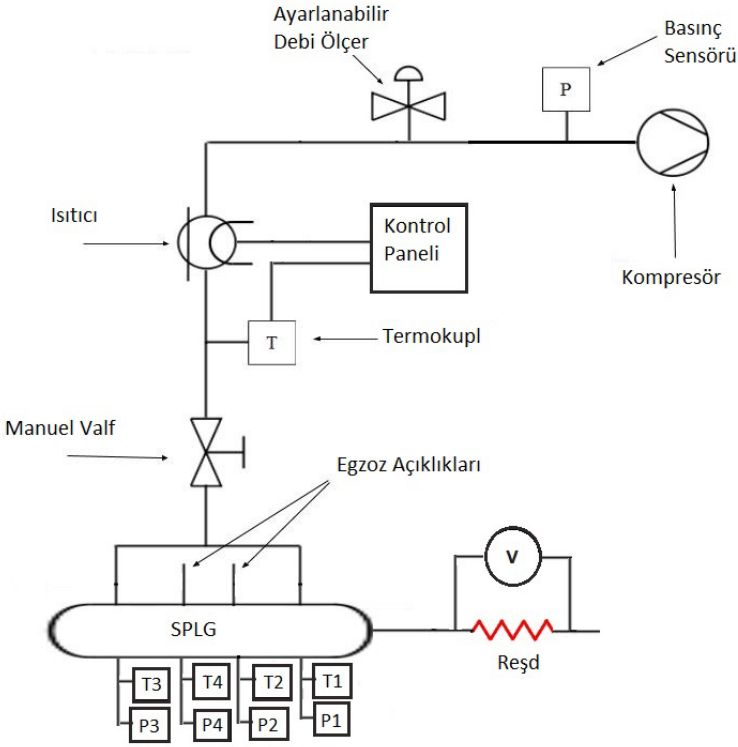
Şekil 1: Odadan odaya çalışma prosesleri: (a) proses 1 → 2: sol odada hava girişi ve sağ odada hava tahliyesi, (b) proses 2 → 3 (güç elde edinimi): sol odada genleşme ve sağ odada sıkıştırma, (c) proses 3 → 4: sağ odada hava girişi ve sol odada hava tahliyesi, (d) proses 4 → 1 (güç elde edinimi): sağ odada genleşme ve sol odada sıkıştırma

SPLG’nin performansını analiz etmek ve literatürdeki diğer genleştirici tipleriyle karşılaştırmak için, basınç ve sıcaklık sensörleri gibi ölçüm cihazlarıyla, veri

edinim sistemiyle, ve bir debi ölçer ile bir test düzeneği geliştirilmiştir. Akışkan olarak hava kullanılmıştır ve bir kompresör aracılığıyla sağlanmıştır. SPLG'ye girişinden önce hava istenen basınçta kompresör tankında depolanmıştır. Kontrol vanası açıldığı anda, SPLG basınçlı hava ile harekete geçirilmiştir. SPLG'ye girişinden önce, bir proses hava ısıtıcısı havayı ısıtmak için kullanılmıştır. SPLG çalışır konumdayken giriş havası kademeli olarak istenen sıcaklıklara getirilmiştir. Her SPLG testinden sonra pistonun soğuması için yeterli süre beklenmiştir. Silindir gövdesi ve giriş hava boru hattı bir fiberglas yalıtım malzemesiyle yalıtılmıştır. SPLG'ye dış yük yüklemek için, birden fazla direnç sistemi deney düzeneğinde kurulmuştur. Test düzeneğinin tümünü gösteren resim Şekil 2'de sunulmuştur. Şekil 3, test düzeneğinin şematığını göstermektedir.



Şekil 2: SPLG test düzeneğinin resmi; 1) SPLG, 2) Elektrikli ısıtıcı, 3) Basınç ölçer, 4) Debi ölçer, 5) Kontrol paneli, 6) Akış kontrol vanası, 7) Direnç bankası, 8) Voltaj ölçümü için LabJack, 9) Sıcaklık ve basınç ölçümleri için LabJack, 10) Masa için C-kelepçesi, 11) Genleştirici tutucusu için L-kelepçesi, 12) SPLG kelepçesi, 13) Giriş hava sıcaklığı ölçümü için termokupl



Şekil 3: Test düzeneğinin şematiği

Giriş hava sıcaklığını ve SPLG odalarının giriş ve çıkış sıcaklıklarını ölçmek için $2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ hassasiyetine sahip K-tipi termokupllar kullanılmıştır. SPLG'nin iki odasındaki giriş ve çıkış deliklerine %2,5 doğruluğuna sahip 4 adet gösterge basınç sensörleri yerleştirilmiştir. Odalardaki termokupllar ve basınç sensörler veri edinim cihazına bağlanmıştır ve bir yazılım aracılığıyla sıcaklık/basınç değerleri görüntülenip kaydedilmiştir. Panele yerleştirilen debi ölçer ile tam ölçeğin %3,0 doğruluğunda genleştiriciye giren ve çıkan debi ölçülmüştür. Ek bir veri edinim cihazı SPLG'nin elektrik devresine bağlanmıştır ve çalışma esnasında üretilen voltaj çıkışı görüntülenip kaydedilmiştir. Voltaj kaydı esnasındaki frekans doğruluğu, tarama hızının (Hz) tarama sayısına oranıdır. Çalışmada izlenen deneylerin tasarımı Tablo 1'de bağımsız değişkenler ve kontrol edilen değişkenler değerleri ile birlikte sunulmuştur.

Tablo 1: Deneylerin tasarımı

Test Seti #	Bağımsız Değişken	Kontrol Edilen Değişkenler
1	Giriş Hava Basıncı Değer Aralığı: 275.8-551.6 kPa Artış Oranı: 68.9 kPa	Giriş Hava Sıcaklığı (90 °C) Direnç Büyüklüğü (0.667 ohm)
2	Giriş Hava Sıcaklığı Değer Aralığı: 50–90 °C Artış Oranı: 10 °C	Giriş Hava Basıncı (413.7 kPa) Resistance Magnitude (0.667 ohm)
3	Direnç Büyüklüğü Değerler: 0.667, 1.667, 3.333, 8.333 ohm	Giriş Hava Basıncı (413.7 kPa) Giriş Hava Sıcaklığı (90 °C)

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

3. Veri Analizi

Termodinamiğin birinci ve ikinci yasaları kullanılarak, analiz yürütülmüştür. Eşitlik 1-5 sürekli rejim durumu altındaki kütle ve enerji korunumlarından ve entropi dengesinden elde edilmiştir. 1, 2, 3, ve 4 alt simgeleri sırasıyla sağ oda girişi, sağ oda çıkışı, sol oda girişi ve sol oda çıkışı temsil eder (Şekil 1’de işaretlenmiştir). Isı kayıpları gözardı edilecek seviyede olduğu varsayılmıştır. Ek olarak, kinetik ve potansiyel enerjilerdeki değişimler gözardı edilecek kadar düşük değerlerdedir ve bu analizde sıfıra eşit sayılmıştır. Hava bir anda sadece bir odaya girdiğinden, her odaya sağlanan hacimsel debi toplam hacimsel debiye eşittir (Eş. 1). Hava ideal gaz olarak ele alınmıştır. Gerçek genleştirici gücü Eş. 2’de ve izantropik genleştirici güç çıkışı Eş. 3’te gösterilmiştir. Özgül ısı (c_p) ve hava gaz sabiti (R_a) sırasıyla 1,005 kJ/kg-K ve 0,2869 kJ/kg-K sabit değerleri olarak ele alınmıştır. Sıcaklık ölçeği sadece 50 °C ile 90 °C arasında değiştiğinden sabit özgül ısı varsayımı uygun görülmüştür. Genleşme işlemi sonrasındaki havanın çıkış sıcaklıkları ($T_{2,c,s}$ and $T_{4,c,s}$), ideal gazların izantropik genleşme bağıntısı kullanılarak ve özgül ısı katsayısı $k=1,401$ alınarak hesaplanmıştır. Üretilen entropi ve tersinmezlik (I) sırasıyla Eş. 4 ve 5’te gösterilmektedir.

$$\dot{m}_g = \dot{m}_c = \dot{m}_{1,g} = \dot{m}_{2,c} = \dot{m}_{3,g} = \dot{m}_{4,c} = \dot{m} = \rho_h \dot{V}_g \quad (1)$$

$$\dot{W}_{c,h} = \dot{m} c_p \{ (T_{1,g} - T_{2,c,h}) + (T_{3,g} - T_{4,c,h}) \} \quad (2)$$

$$\dot{W}_{c,s} = \dot{m} c_p \{ (T_{1,g} - T_{2,c,s}) + (T_{3,g} - T_{4,c,s}) \} \quad (3)$$

$$\dot{S}_u = \dot{m} \left\{ \left[c_p \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) - R_a \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \right] + \left[c_p \ln \left(\frac{T_4}{T_3} \right) - R_a \ln \left(\frac{P_4}{P_3} \right) \right] \right\} \quad (4)$$

$$I = T_s \dot{S}_u \quad (5)$$

Hacimsel debi scfm biriminde ölçüldüğü için hesaplamalarda havanın yoğunluğu (ρ_h) 1.225 kg/m³ olarak alınmıştır. T_s değeri 20 °C olarak varsayılmıştır. Eş. 6 kullanılarak kontrol hacmi için izantropik verim hesaplanmıştır. SPLG’nin hacimsel verimi, gerçek kütleli debinin ideal prosesin kütleli debisine oranı olarak tanımlanmıştır. Böylece, hacimsel verim Eş. 7 tarafından belirlenmiştir. Eş. 7 odaların birine sağlanan havanın kütleli debisine, yer değiştirme hacmine ve piston hareketinin frekansına bağlı bir fonksiyondur. Genleştiricinin çalışma frekansı

voltaj-zaman çıktı verisi üzerine uygulanan Fast Fourier Dönüşümü aracılığıyla hesaplanmıştır. Eş. 8 ve Eş. 9 kullanılarak, sırasıyla ortalama elektrik güç çıktısı ve mekanik-elektriksel dönüşüm verimi hesaplanmıştır. Ortalama elektrik güç çıktısı, voltaj ortalama karekök değerine ve dış yükün eşdeğer direncine bağlıdır.

$$\eta_s = \frac{\dot{W}_{c,h}}{\dot{W}_{c,s}} \quad (6)$$

$$\lambda = \frac{\dot{m}_h}{\rho_h V_y f} \quad (7)$$

$$W_{e,ort} = \frac{V_{RMS}}{R^2_{eşd}} \quad (8)$$

$$\eta_d = \frac{W_{e,ort}}{W_{c,gerçek}} \quad (9)$$

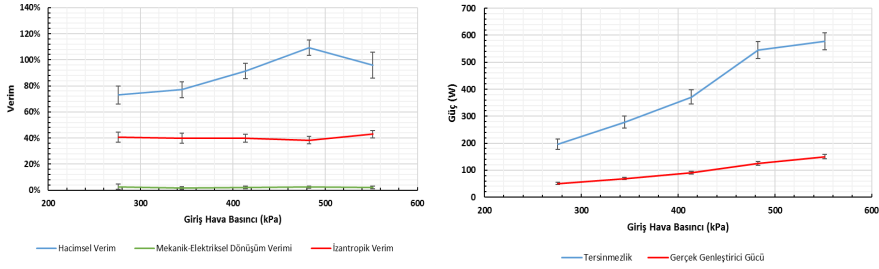
Verilerin hesaplanmasında birçok enstrümandan ölçüm alındığı için ve hesaplanan parametrelerin doğruluklarını belirlemek adına, belirsizlik analizi yürütülmüştür. Hesaplanan parametrelerin standart sapmaları, hatanın yayılması formülü kullanılarak belirlenmiştir (Eş. 10).

$$\sigma_x^2 = \left(\frac{\delta x}{\delta a}\right)^2 \sigma_a^2 + \left(\frac{\delta x}{\delta b}\right)^2 \sigma_b^2 + \left(\frac{\delta x}{\delta c}\right)^2 \sigma_c^2 \quad (10)$$

4. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma

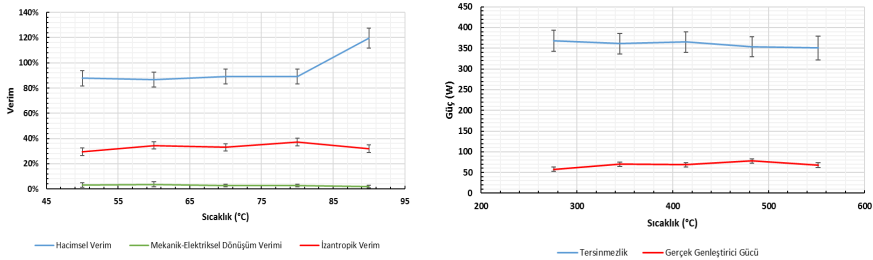
SPLG'nin sürekli rejim çalışması elde edildikten sonra, SPLG'nin performansını analiz etmek adına deneyler yürütülmüştür. Deneylerde havanın giriş basıncı ve giriş sıcaklığı ve genleştiriciye dış yük olarak bağlanan elektrik direnci değiştirilmiştir. Sıcaklık ölçümlerinde sabit değerlere ulaşıldığı gözlemlenen aralık sürekli rejim alanı olarak seçilmiştir. Sürekli rejim alanındaki termodinamik ve voltaj verilerinin ortalama değerleri her deneyin analizi için sürekli rejim özellikleri olarak kullanılmıştır.

Giriş hava sıcaklığını 90 °C'de ve direnci 0,67 ohm'da tutarken, 276 kPa-552 kPa (40-80 psi) aralığında 69 kPa aralıklarla değişken hava giriş basıncının etkileri incelenmiştir. Sonuçlar genleştiricinin %21.5 maksimum izantropik verime eriştiğini göstermektedir. Gerçek genleştirici gücü ve elektrik güç çıktısı sırasıyla 150,3 W ve 3,30 W olarak elde edilmiştir (Şekil 4). Özellikle, yüksek giriş hava basınçlarında genleştiricinin çalışma frekansı yükselmiştir. Bu durum piston hızıyla bağlantıyı göstermektedir. Deneyler giriş basıncıyla hacimsel debi ve voltaj çıktısı arasında direkt bir bağlantı göstermektedir. Hacimsel debi 483 kPa'da %109 olarak zirve yaparken, voltaj çıktısı maksimum 1,47 V'a erişmiştir. Bu volt değerindeki elektrik güç en yüksek değerine ulaşmıştır. Fakat, mekanik-elektriksel dönüşüm verimi %1,5 ve %2,6 arasında değişmiştir (Şekil 4a). Bu durum özellikle optimize edilmemiş güç üretim devresi tasarımından dolayı genleştirici gücünü elektrik gücüne dönüştürmedeki verimsizliği göstermektedir. Farklı basınçlarda sabit izantropik verimlerinin elde edilmesinin yanında, gerçek genleştirici gücü tersinmezlik ile beraber artış göstermiştir. Bu durum yüksek basınçlarda sürtünme kayıplarının artmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 4b).



Şekil 4: Farklı giriş hava basınçlarındaki performans: (a) verimler (b) gerçek genleştirici gücü ve tersinmezlik.

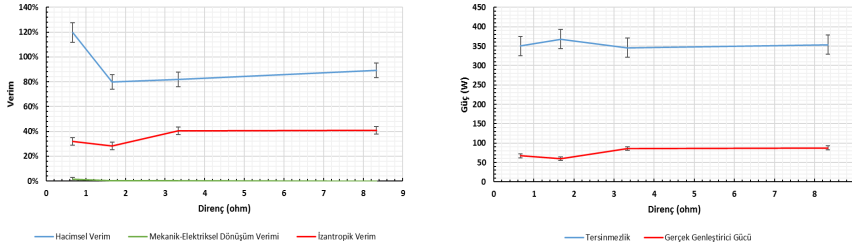
Giriş hava basıncını, hacimsel debiyi ve direnci sırasıyla 414 kPa, 6,1 m³/hr, ve 0,67 ohm'da sabit tutarken, giriş hava sıcaklığı 50 °C ile 90 °C aralığında değiştirilmiştir. Özellikle, maksimum izantropik verimin 80 °C'de %19 olarak görülmüştür, ve deneydeki gerçek genleştirici gücünün 78 W ve elektrik gücünün 1,95 W olduğu gözlemlenmiştir. Frekans değerleri bu deney setinde 50 °C'de 35 Hz'den 90 °C'de 31 Hz'e kadar sıcaklık arttıkça düşüş göstermiştir. En yüksek voltaj ortalama karekök değeri (1,83 V) ve elektrik gücü (2,48 W), 60 °C'de kaydedilmiştir. Bu çalışma izantropik verimin %15 ile %19 arasında değiştiğini göstermiştir. Hacimsel debi 90 °C'de %120 olarak zirve yapmıştır. Bu durumda sızdırmazlık halkalarından iç sızıntı oluştuğu düşünülmektedir (Şekil 5a). Gerçek genleştirici gücü 80 °C'de zirve yaparak 78,06 W değerine ulaşmıştır, fakat, farklı sıcaklıktaki değerler birbirine yakın olarak görülmüştür (Şekil 5b). Diğer tarafta, tersinmezlik giriş hava sıcaklığı arttıkça azalma yönünde eğilim göstermiştir.



Şekil 5: Farklı giriş hava sıcaklıklarındaki performans: (a) verimler (b) gerçek genleştirici gücü ve tersinmezlik.

Son deney serisinde, giriş hava sıcaklığı ve basıncı sırasıyla 90 °C'de ve 414 kPa'da sabit tutulmuştur ve elektrik yükü 0,67 ohm'dan 8,33 ohm'a kadar değiştirilmiştir. SPLG 8,33 ohm'da maksimum izantropik verimini (%20) göstermiştir. Bu deneyde 87,3 W gerçek genleştirici gücü hesaplanırken sadece 0,03 W elektrik gücü üretilmiştir (Şekil 6). Voltaj ortalama karekök değeri 8,33 ohm dirençte 2,32 V olarak zirve yaparak yük direnci arttıkça artış göstermiştir. Fakat, elektrik gücü yük ile ters orantılı bağıntı göstermiştir ve 1,13 W olarak en düşük direnç olan 0,67 ohm'da zirve yapmıştır. SPLG'nin frekansı rezistans ile değişim göstermiştir. İlk olarak 1,67 ohm'da 38 Hz olarak maksimuma ulaşırken, daha yüksek

dirençlerde düşüşe geçmiştir. İzantropik verim %14 ile %20 arasında değişirken, en yüksek elektrik gücü çıktısı, %1,7'lik düşük mekanik-elektriksel dönüşüm verimine (Şekil 6a) rağmen en düşük dirençte gözlemlenmiştir. Hacimsel verim en düşük dirençte %120 olarak elde edilmiştir. Bu durum potansiyel bir iç sızıntının olduğunu göstermektedir. Direnç arttıkça, gerçek genişletirici gücü de artmıştır. Bu eğilim, yüksek dirençlerde gerçek genişletirici gücünün, tersinmezlik değişimi ihmal edilecek seviyede kalırken daha da artacağını göstermektedir (Şekil 6b).



Şekil 6: Farklı dirençlerdeki performans: (a) verimler (b) gerçek genişletirici gücü ve tersinmezlik.

Şekil 4-6'larda sunulan hata çubukları her bir deney için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Çalışmanın kısa tutulması için sadece farklı giriş hava basınçlarındaki performans testlerinde elde edilen hata değerleri yüzdelik olarak Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 2: Farklı giriş hava basınçlarındaki performans testlerinde elde edilen yüzdelik hata değerleri

Standart Sapma Yüzdeleri					
Giriş Hava Basıncı	276 kPa	345 kPa	414 kPa	483 kPa	552 kPa
Gerçek Genişletirici Gücü	%16	%14	%12	%11	%10
Tersinmezlik	%19	%16	%14	%11	%11
İzantropik Verim	%20	%20	%15	%16	%14
Mekanik-Elektriksel Dönüşüm Verimi	%38	%32	%25	%22	%23
Hacimsel Verim	%10	%8	%7	%5	%10

5. Sonuçlar

Vanasız SPLG'nin uzun süreli sürekli rejim çalışması başarılı bir şekilde elde edilmiştir. SPLG'nin performansını analiz etmek için, giriş hava basıncını, giriş hava sıcaklığını ve elektriksel direnci değiştirilerek üç farklı deney seti uygulanmıştır.

SPLG'nin frekans çıktısı giriş hava basıncı arttıkça artış, giriş hava sıcaklığı arttıkça düşüş göstermiştir. Tüm deneylerdeki maksimum frekans 44 Hz olarak belirlenmiştir. SPLG maksimum 2,32 V voltaj ortalama karekök değerini üretmiştir. Sonuçlardan görüldüğü üzere, üretilen voltaj giriş hava basıncı ve direnç arttıkça artma eğilimindedir. Voltaj için optimum giriş hava sıcaklığı 60 °C olarak belirlenmiştir.

SPLG'nin maksimum izantropik verimi %21.5 olarak elde edilmiştir. Bu noktadaki maksimum gerçek genleştirici güç ve maksimum elektrik güç sırasıyla 150,3 W ve 3,30 W olarak gözlemlenmiştir. Mekanik-elektriksel dönüşüm verimi %0,04 ile %3,5 arasında değişim göstermiştir. Bu düşük verim aralığı optimize edilmiş güç üretim elektrik devresinden kaynaklanmaktadır ve gelişmeye açık bu alan ayrı bir çalışmanın konusu olmalıdır. Giriş hava sıcaklığını değiştirmek hacimsel verimi önemli ölçüde değiştirmedir (hata toleransı dahilindedir). Göreceli olarak yüksek hacimsel verim 90 °C ve 0,67 ohm'da gözlemlendi. Bunun muhtemel sebebinin, sızdırmazlık halkaları ile silindir duvarları arasında meydana gelen aşırı iç sızma olduğu düşünülmektedir.

Giriş hava basıncı arttıkça SPLG'nin gerçek genleştirici gücü artmıştır ve 552 kPa'da maksimuma erişmiştir. Direnci 1,67 ohm'dan 8,33 ohm'a kadar arttırmak ayrıca daha yüksek gerçek genleştirici güç çıktılarına sonuç vermiştir. Diğer tarafta, tersinmezlik değerleri giriş hava basıncı arttıkça artış, giriş hava sıcaklığı arttıkça azalış göstermiştir. Fakat, farklı giriş hava sıcaklığında olan tersinmezlik değişimleri hata toleransı içindedir.

SPLG'nin maksimum izantropik verimi %21,5 olarak belirlenmiştir. Bunun, bu vanasız SPLG tasarımının ilk iterasyonu olduğu not edilmelidir. Gelecek çalışmalar için, O-ring malzemesi geliştirilmelidir. Böylece daha iyi sızdırmazlık ve O-ringler ile silindir duvarı arasında daha düşük sürtünme elde edilebilir. Ek olarak, gerçek genleştirici gücü ve elektrik güç üretimi arasındaki farkı düşürmek için, mekanik-elektriksel dönüşüm mekanizması iyileştirilmelidir. Bu sebeple, mıknatıs seçimi, tel sarımı ve elektriksel devre tasarımı üzerine daha fazla araştırma yürütülebilir.

Teşekkür

Bu çalışma University of North Florida Mühendislik Fakültesi ve Hank Bonar tarafından desteklenmiştir. Ek olarak, Matt Hawn, Miranda Johanning, Kyle Parker, ve Blair Clarkson ilk prototipin imalatında yardım etmiştir.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir

Simgeler (Symbols)

c_p : Özgül ısı katsayısı (kJ/kgK)

f : frekans (Hz)

I : Tersinmezlik (W)

$\dot{m}$: Kütsel debi (kg/s)

P : Basınç (kPa)

R_{esd} : Eşdeğer direnç (ohm)

S : Entropi (kJ/K)

T : Sıcaklık (°C)

$\dot{V}$: Hacimsel debi (m^3/s)

V_{RMS} : Ortalama karekök voltajı (V)

V_y : Yer değiştirme hacmi (m^3)

$\dot{W}$: Güç (W)

Yunan Harfleri (Greek Letters)

η_d : Mekanik-elektriksel dönüşüm ve

η_s : İzantropik verim

λ : Hacimsel verim

ρ : Yoğunluk (kg/m^3)

σ : Standart sapma

Alt İndis (Subscript)

1: Silindir 1. port

2: Silindir 2. port

3: Silindir 3. port

4: Silindir 4. Port

$\dot{c}$: çıkış

$\dot{c}_{gercek}$: gerçek çıkış

e,ort: ortalama elektrik

g: giriş

h: hava

s: izantropik

ü: üretilen

Referanslar

Aliahmadi M., Moosavi A., Sadrhosseini H. (2021). Multi-objective optimization of regenerative ORC system integrated with thermoelectric generators for low-temperature waste heat recovery, *Energy Reports*, 7, 300-313. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.12.035>

Braimakis K. (2024). Mapping the waste heat recovery potential of CO2 intercooling compression via ORC. *International Journal of Refrigeration*, 159, 309-332. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2024.01.008>

Bonar H. (2002). U.S. Patent No. 6,484,498, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Fatigati F, Bartolomeo M.D., Cipollone R. (2024). Model-based optimisation of solar-assisted ORC-based power unit for domestic micro-cogeneration, *Energy*, 308, 132785. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132785>

Glavatskaya Y., Podevin P., Lemort V., Shonda O., Descombes G. (2012). Reciprocating expander for an exhaust heat recovery Rankine Cycle for a passenger car application, *Energies*, 5(12), 1751-1765. Doi: <https://doi.org/10.3390/en5061751>

Harada K.J. (2010). Development of a small scale scroll expander (Yüksek Lisans Tezi). Oregon State University, ABD. Erişim adresi: https://ir.library.oregonstate.edu/concern/graduate_thesis_or_dissertations/dj52w838c

Hu J., Li M., Zhao L., Xia B., Ma Y. (2015). Improvement and experimental research of CO₂ two-rolling piston expander, *Energy*, 93, 2199-2207. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.097>

Imran M., Usman M., Park B. S., Lee D.H. (2016). Volumetric expanders for low grade heat and waste heat recovery applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 1090-1109. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.139>

International Energy Agency (2013). World Energy Outlook 2013, Paris, 708. Erişim adresi: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/a22dedb8-c2c3-448c-b104-051236618b38/WE02013.pdf>

Ismael M.A., Aziz A.R.A., Zainal E.Z., Mohammed S.E., Ayandotun W.B., Baharom M.B., Sallehudin M.S., Syakirin M., Anwerudin A.R.T., Masri M.M. (2021). Investigation on free-piston motion and power generation of a dual-piston air-driven expander linear generator, *Energy Reports*, 7, 2388-2397. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.04.035>

Li X, Han S., Liu Z., He C., Zhang B., Chen Q. (2023). Design optimization and analysis of a multi-temperature partition and multi-configuration integrated organic Rankine cycle for low temperature heat recovery. *Energy Conversion and Management*, 293 (1), 117504. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117504>

Li G., Zhang H., Yang F., Song S., Chang Y., Yu F., Wang J., Yao, B. (2016). Preliminary development of a free piston expander-linear generator for small-scale Organic Rankine Cycle (ORC) waste heat recovery system, *Energies*, 9(4), 300. Doi: <https://doi.org/10.3390/en9040300>

Mathias J. A., Johnston J.R., Cao J., Priedeman D.K., Christensen R.N. (2009). Experimental testing of gerotor and scroll expanders used in, and energetic and exergetic modeling of an Organic Rankine Cycle, *Journal of Energy Resources Technology*, 131(1), 012201-1-012201-9. Doi: <https://doi.org/10.1115/1.3066345>

Pambudi N.A., Wibowo S., Ranto, Saw L.H. (2021). Experimental investigation of Organic Rankine Cycle (ORC) for low temperature geothermal fluid: Effect of pump rotation and R-134 working fluid in scroll-expander, *Energy Engineering*, 118(5), 1565-1576. Doi: <https://doi.org/10.32604/EE.2021.016642>

Peng B., Tong L., Guo C., Huo W. (2021). Experimental research and performance analysis of a free piston expander-linear generator coupled with a driving motor. *Energy Reports*, 7, 1349-1359. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.02.066>

Peng B., Tong L., Yan D., Huo W. (2022). Experimental research and artificial neural network prediction of free piston expander-linear generator, *Energy Reports*, 8, 1966-1978. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.01.021>

Permana D.I., Fagioli F., Lucia M.D., Rusirawan D., Farkas I. (2024). Energy, exergy, environmental and economy (4E) analysis of the existing of biomass-ORC plant with capacity 150 kW_e: A case study, *Energy Conversion and Management*: X, 23, 100646. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100646>

- Preetham B., Weiss, L. (2016). Investigations of a new free piston expander engine cycle, *Energy*, 106, 535-545. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.082>
- Smith I. K., Stosic N., Aldis C. A., Kovacevic A. (2000). Twin screw two-phase expanders in large chiller units, London: City University London. Erişim adresi: <https://www.staff.city.ac.uk/~sj376/smith99a.htm>
- Smith I.K., Stosic N., Kovacevic A. (1999). Power recovery from low cost two-phase expanders, London: City University London. Erişim adresi: <https://www.staff.city.ac.uk/~ra601/exp.pdf>
- Smith I.K., Stosic N., Kovacevic A. (2005). Screw expanders increase output and decrease the cost of geothermal binary power plant systems, London: City University London. Erişim adresi: <https://www.staff.city.ac.uk/~ra601/grc2005.pdf>
- Stainchaouer A., Schiffelechner C., Wieland C., Sakalis G., Spliethoff H. (2024). Evaluating long-term operational data of a very large crude carrier: Assessing the diesel engines waste heat potential for integrating ORC systems, *Applied Thermal Engineering*, 255, 123974. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123974>
- Tian Y., Zhang H., Li G., Hou X., Yu F., Yang F., Yang Y., Liu Y. (2017). Experimental study on free piston linear generator (FPLG) used for waste heat recovery of vehicle engine, *Applied Thermal Engineering*, 127, 184-193. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.031>
- Wang Y., Chen L., Jia B., Roskilly A.P. (2017). Experimental study of the operation characteristics of an air-driven free-piston linear expander, *Applied Energy*, 195, 93-99. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.032>
- Wang T., Zhou T., Feng Y., Zhang M., Zhu S., Yang H. (2024). Poly-generation system with waste heat of low-temperature flue gas in power plants based on organic Rankine cycle, *Applied Thermal Engineering*, 242, 122513. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122513>
- Wu Z., Zhang H., Liu Z., Hou X., Li J., Yang F., Zhang J. (2021). Experimental study on the performance of single-piston free-piston expander-linear generator, *Energy*, 221, 119724. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119724>
- Xu X., Zhang L., Zhang H., Ma J., Sambatmaryde K. (2024). Performance analysis of a novel small-scale integrated solar-ORC system for power and heating, *Solar Energy*, 274, 112605. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112605>
- Yagoub W., Doherty P., Riffat S. (2006). Solar energy-gas driven micro-CHP system for an office building, *Applied Thermal Engineering*, 26(14-15), 1604-1610. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.11.021>
- Yan L., Liu J., Ying G., Zhang N. (2023). Simulation analysis of flue gas waste heat utilization retrofit based on ORC system, *Energy Engineering*, 120 (8), 1919-1938. Doi: <https://doi.org/10.32604/ee.2023.027546>
- Yang B., Peng X., He Z., Guo B., Xing Z. (2009). Experimental investigation on the internal working process of a CO2 rotary vane expander, *Applied Thermal Engineering*, 29(11-12), 2289-2296. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.11.023>
- Zhang, B., Peng X., He Z., Xing Z., Shu P. (2017). Development of a double acting free piston expander for power recovery in transcritical CO2 cycle, *Applied Thermal Engineering*, 27(8-9), 1629-1636. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.05.034>