

Beta Tipi Rejeneratörlü Bir Stirling Motorunun Tasarımı ve Testleri

Fatih AKSOY¹, Muhammed ARSLAN^{2,*}, Hamit SOLMAZ³

¹Afyon Kocatepe Üniversitesi/ Teknoloji Fakültesi, Afyonkarahisar, Türkiye

²Afyon Kocatepe Üniversitesi/ Çay Meslek Yüksekokulu, Afyonkarahisar, Türkiye

³Gazi Üniversitesi/Teknoloji Fakültesi, Ankara, Türkiye

*arlanmuhammed10@gmail.com

ÖZET

Bu çalışmada, rhombic hareket iletim mekanizması sahip, beta tipi bir Stirling motorunun imalatı yapılmış ve performans testleri gerçekleştirilmiştir. Rejeneratör kullanımının motor performansı üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla motorda 60 cm³ bir renejeratör kullanılmıştır. Rejeneratör malzemesi olarak % 15 doluluk oranı ve 0,15 mm çapında paslanmaz çelik teller kullanılmıştır. Ayrıca hareket iletim mekanizmasında güç çıkışını artırmak ve daha sessiz bir çalışma için düz dişli yerine helisel dişli kullanılmış, krank mili üzerinde dişliler çift taraflı yataklandırılmıştır. Deneyler 800±5 °C sıcak uç sıcaklığında ve 3 bar şarj basıncında çalışma maddesi olarak helyum kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Motor performansı rejeneratör kullanımı ile belirgin bir şekilde artmıştır.

Anahtar Kelimeler: Rhombic hareket mekanizması, Stirling motoru, Rejeneratör.

The Desing and Tests of A Beta Type Stirling Engine

ABSTRACT

In this study, a Stirling engine having rhombic drive mechanism is manufactured and its performance tests are performed. In order to determine effect of using regenerator on engine performance, a regenerator whose volume is 60 cm³ is used. Stainless steel wires having 15 % filling ratio and with a diameter of 0.15 mm are used as regenerator material. In order for increasing output power of drive mechanism and a quieter operation, also, helical gears are used instead of spur gears by bearing from both side on the crankshaft. Experiments are carried out at hot end temperature of 800±5 °C and charged pressure of 3 bar with helium as working fluid. In results, engine performance increases seriously with using of regenerator.

Keywords: Rhombic drive mechanism, Stirling engine, Regenerator.

GİRİŞ

Fosil enerji rezervlerinin kullanıldığında açığa çıkardıkları egzoz gazları, çevreye verdiği zararlar (Kadri ve Hadj Abdallah, 2016), bazı iklim değişimleri (Yang ve Cheng, 2017a; Lee ve ark., 2017) gibi olumsuz durumlara sebep olduğu bilinmektedir. Dünya çapında ağır endüstrilerin fosil enerji kaynaklarına dayalı olması, politik stratejiler (Gheith ve ark., 2015), artan enerji talebi gibi sebepler, insanlığında temiz bir çevre sağlayacak ve sürdürülebilir alternatif bir çözüm bulma dürtüsü uyandırmıştır (Lee ve ark., 2017; Ng ve ark., 2017; Ahmadi ve ark., 2017). Günümüzün enerji ve çevre sorunlarına yönelik olası çözümler arasında Stirling motorları, yüksek termal verim, düşük bakım gereksinimi, enerji kaynağı talebinde esneklik gibi olumlu yanlarından dolayı son yıllarda büyük ilgi görmüştür (Chen ve ark., 2014; Li ve ark., 2014). Özellikle, güneş enerjisi, endüstriyel atık ısı ve biyokütle yakıtları gibi geniş bir enerji kaynağı yelpazesini kullanma becerileri, onları fosil yakıtların tükenmesi ve küresel ısınma sorunlarına en umut verici çözümlerden biri yapmıştır (Chen ve ark., 2014; Abueulyamen ve ark., 2017).

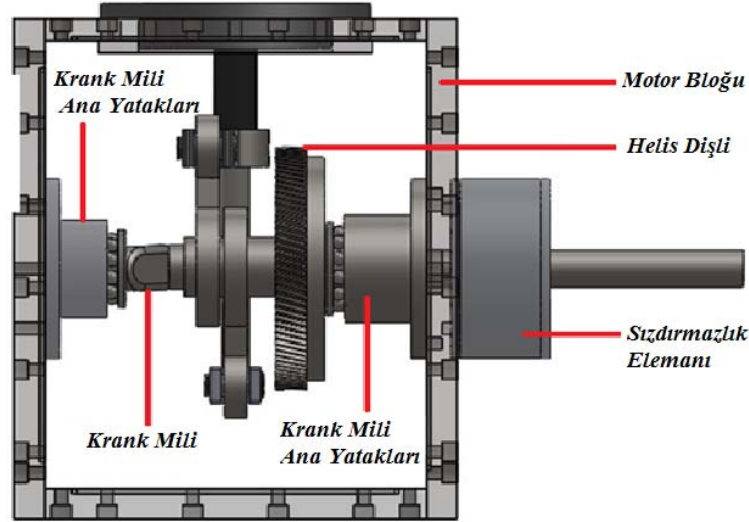
Stirling motorları, 1816'da ısı rejenerasyonunu temel termodinamik çevrimine ekleyen Robert Stirling tarafından geliştirilmiştir. Bu temel termodinamik çevrim iki izoterm ve iki izokor hal değişimini içermektedir. Bu teknoloji özellikle Organik Rankine Çevrimleri olarak diğer teknolojilerin daha az verimli olduğu 100 kW ve üzerindeki güç üretimleri için uygundur (Mabrouk ve ark., 2015). Teorik Stirling çevrimlerinin termik verimleri Carnot çevrimlerinin ki kadar yüksek olsa da, gerçek bir Stirling çevriminde ısı transfer direnci, birtakım enerji kayıpları, akış direnci ve gaz kaçağı kaçınılmazdır ve ideal çevrimden belirgin düzeyde bir sapmaya sebep olmaktadır (Ni ve ark., 2016). Bu kaçaklar, displacer-silindir boşluğu boyunca sıkıştırma ve genişleme boşlukları arasında ve güç pistonu-silindir boşluğu boyunca sıkıştırma ve sınır boşlukları arasında oluşmaktadır (Mabrouk ve ark., 2015). Sıkıştırma ve genişleme boşlukları ve çalışma gazı akış konfigürasyonuna bağlı olarak alfa, beta ve gama tipi (Barreto ve Canhoto, 2017; Yang ve Cheng, 2017b); sıcak ve soğuk uçlar arasındaki sıcaklık farkına bağlı olarak yüksek ve düşük sıcaklık farklı motorlar olmak üzere sınıflandırılabilirler. Ayrıca çevrimin tersine çalışması halinde ısı pompası olarak kriyojenik soğutma sistemlerinde de kullanılabilirler (Barreto ve Canhoto, 2017).

Stirling motorlarında performans seviyesini belirleyen ve temel amacı, ısıtıcıda eklenmesi gereken ısı miktarını bir termal ısı deposu olarak en aza indirmek ve böylece termal verimliliği arttırmak olan önemli bir faktör rejeneratördür (Tanaka ve ark., 1990; Andersen ve ark., 2006). Rejeneratör, büyük bir ısı aktarım alanına ve büyük bir ısı kapasitesine sahip gözenekli bir matris ile doldurulmuş bir boşluktur. Bunu, çalışma akışkanı ısıtıcıdan soğutucuya doğru akarken akışkanın ısını emerek ve akışkan soğutucudan ısıtıcıya doğru akarken enerjiyi serbest bırakarak gerçekleştirmektedir (Andersen ve ark., 2006). Günümüze kadar, motor performansını iyileştirmek için Stirling motorunun merkezi ve önemli bileşeni olan rejeneratör üzerinde yoğun araştırmalar yapılmıştır. Geleneksel tel örgü tipi rejeneratör, geniş ısı transferi alanı, çok sayıda silindirik şekilli tellerin çapraz akışının getirdiği yüksek konvektif ısı transfer katsayısı ve düşük eksenel termal iletkenlik nedeniyle Stirling motorlarında en yaygın olarak kabul görmüştür (Li ve ark., 2014).

Bu çalışmada, rhombic hareket iletim mekanizmalı beta tipi bir Stirling motorunun tasarımı, imalatı ve performans testleri gerçekleştirilmiştir. Rejeneratör olarak 60 cm³ bir rejeneratör kullanılmış ve rejeneratörün motor performansına etkileri deneysel olarak incelenmiştir.

Stirling Motorunun İmalat Özellikleri

Rejeneratörlü ve rhombic hareket mekanizmalı beta tipi Stirling motorunu, hareket iletim mekanizması ve bu mekanizmanın yerleştirildiği motor bloğu oluşturmaktadır. Motorun temel parçaları motor bloğu, motor bloğu kapakları, krank mili yatakları, krank milleri, dişliler, biyel kolları, ara bağlantı elemanları ve volan olarak sıralanabilir. Şekil 1'de motorun temel parçaları gösterilmiştir.



Şekil 1. Stirling Motorunun Temel Parçalarının Şematik Görünümü

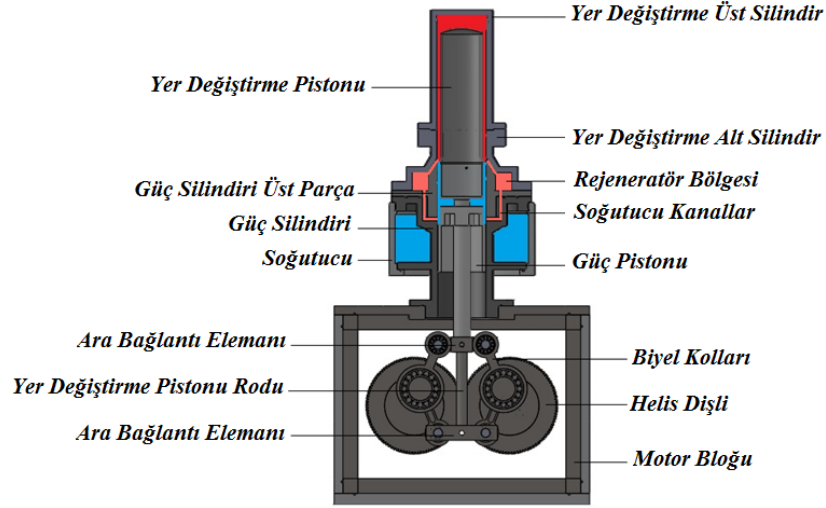
Motor bloğu ana gövdesi 25x25 mm kalınlığında Ç1040 malzemelerin kaynakla birleştirilmesi ile imal edilmiştir. Motor bloğu ana gövdesi birleşme yüzeyleri çalışma maddesi kaçaklarını en aza indirmek için hassas bir şekilde taşlanmıştır. Motorun krank millerini ve silindirinin bağlandığı kapaklar Ç1040 plakalardan imal edilmiştir. Kapak yüzeyleri hassas bir şekilde taşlanmış ve çalışma maddesi kaçaklarını önlemek için O-ring kanalı açılmıştır. Motor bloğu alt ve yan kapakları alüminyum 5050 malzemeden hassas bir şekilde imal edilmiştir. Motor bloğundan çalışma maddesi kaçaklarını önlemek amacı ile her bir kapak üzerine O-ring kanalı açılmıştır. Çalışma maddesinin motor bloğuna şarj edilebilmesi ve basıncın ölçülebilmesi için yan kapak üzerine bir çek valf ve bir manometre monte edilmiştir.

Krank mili 4140 ıslah çeliğinden tek parça halinde yapılmıştır. Krank mili ana ve kol muylu yüzeyleri hassas bir şekilde taşlanmıştır. Dişliler sementasyon çeliğinden imal edilmiş ve 52 Rockwell C derecesinde sertleştirilmiştir. Krank mili üzerine dişliler civata ile bağlanmıştır. Krank mili ve dişliler motor bloğuna ana yataklar yardımıyla bağlanmış ve krank milindeki sürtünme kayıpları ve aksel gezintiyi ve millerdeki eğilme momentlerini azaltmak için her yatakta iki adet rulman kullanılmıştır.

Krank mili ana yatakları Ç1040 malzemeden imal edilmiştir. Krank mili ana yatakları üzerine alın ve silindirik olmak üzere iki adet rulman yerleştirilmiştir. Krank mili ana yataklarını motor bloğuna bağlamak için 4 adet civata deliği açılmıştır. Gaz kaçaklarını önlemek amacı ile krank mili ana yatakları üzerine O-ring kanalları açılmıştır.

Yer değiştirme ve güç pistonları rhombic biyel kollarına ara bağlantı elemanları vasıtası ile bağlanmaktadır. Ç1040 malzemeden imal edilmiştir. Rhombic biyel kolları alüminyum 7000 serisi malzemeden imal edilmiştir. Rhombic biyel kolları sürtünme kayıplarını azaltmak amacı ile muylulara rulmanlar vasıtası ile bağlanmıştır.

Şekil 2'de rejeneratörlü olarak tasarlanan motorun parçaları görülmektedir. Yer değiştirme silindiri üst ve alt olmak üzere iki parçalı olarak paslanmaz ASTM 304 çelikten imal edilmiştir. Sıcak hacimdeki çalışma maddesinin rejeneratöre geçişi sırasında ısı transferini artırabilmek amacı ile yer değiştirme silindiri üst ve alt parçanın iç yüzeyine 3 mm derinliğinde 2 mm genişliğinde 80 adet kanal açılmıştır. Yer değiştirme üst ve alt silindirleri birbirine 12 civata ile bağlanmıştır. Rejeneratör malzemesi yer değiştirme alt silindir ve güç silindiri üst parça arasına yerleştirilmektedir. Ölü hacmi azaltmak ve soğutma performansını geliştirmek için güç silindiri ve güç silindiri üst parçası içerisine açılan, 3 mm genişliğinde, 8 mm boyunda ve 45 mm derinliğinde 70 adet soğutma kanalı içerisine 5 mm boyunda, 3 mm genişliğinde ve 45 mm derinliğinde 70 adet bakır çubuk yerleştirilmiştir.



Şekil 2. Rejeneratörlü Stirling Motorunun Parçaları

Deney Düzenegi

Parçaların üretimi ve montajı yapıldıktan sonra testler gerçekleştirilmiştir. Test ortamı prony tip dinamometre, yük hücresi, enkoder, termokupl, infrared termometre ve veri kayıt yazılım programından oluşmaktadır. Şekil 3'te test ortamı görülmektedir.



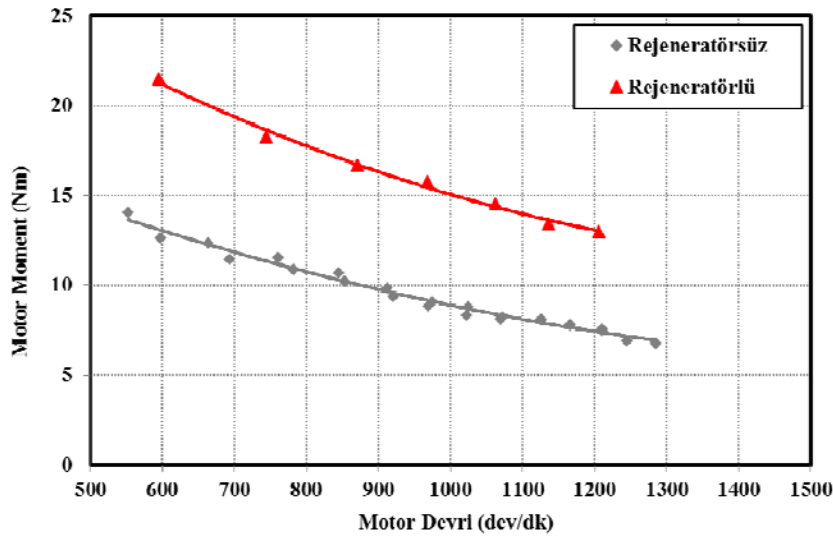
Şekil 3. Test Ortamı

Motor momenti prony tip sürtümlü frenleme mekanizmasına sahip bir dinamometre ile ölçülmüştür. Dinamometre, fren diskini sıkıştırarak yüklemeyi sağlayan bir hidrolik frenleme tertibatı, üzerinde frenleme diskinin bulunduğu ve iki ucundan rulmanlarla yataklandırılmış bir mil, bir load cell bir moment kolundan oluşmaktadır. LIKA marka encoder, motor devrinin ölçümünde kullanılmıştır. Cihaz, ölçümü dev/dk cinsinden yapabilmekte ve 0-360 derece aralığında bilgisayara 5000 veri gönderebilmektedir. Dolayısıyla, yük hücresi ve sıcaklık alıcıları (termokupl)'na ait verilerin bilgisayara taşınmasında görev almaktadır. ESIT marka yük hücresi yük ölçümünde kullanılmıştır. Bir tarafı sabitken diğer tarafı dinamometrenin kuvvet kolunun rahatça baskı yapabileceği şekilde bağlanmış ve 0'dan 20 kg'a kadar ölçüm yapabilmektedir. Termokupl, Elimko firması tarafından imal edilmiş ve 1000°C sıcaklığa kadar ölçüm yapabilmektedir. Ölçüm için motorun sıcak ve soğuk bölgelerine bağlanmaktadır. Test esnasında motorun herhangi bir noktasından sıcaklık ölçümü

yapabilmek için 60-1000 °C arasında \pm % 2 hassasiyetinde ölçüm yapabilen TFA ST-490 marka bir infrared termometre kullanılmıştır. Motora helyum gazıyla karterden şarj uygulanmış ve şarj basıncı, dijital basınç göstergesi ile denetlenmiştir. Rejeneratörde paslanmaz çelik örgü, rejeneratör malzemesi olarak kullanılmıştır. Rejeneratör tel örgüde 0.15 mm çapında paslanmaz teller kullanılmış ve rejeneratör bölgesi bu malzeme ile doldurulmuştur. Rejeneratördeki doluluk oranı % 15 olarak belirlenmiştir. Stirling motoruna ısının verilebilmesi için geliştirilen 2 kW gücünde bir yanma odası temin edilmiştir. Yanma odasından ısı enerjisinin motora aktarılması için iki farklı silindir için ara bağlantı elemanları imal edilmiştir. Motor performans yazılımı yük hücresi, encoder ve sıcaklık sensörlerinden elde edilen bilgiler ara yüz bölümünden geçtikten sonra bilgisayara kayıt edilmektedir. Motor performans yazılım programı ile motor devrine bağlı olarak motor gücü, motor moment, sıcaklık verileri kayıt altına alınabilmektedir.

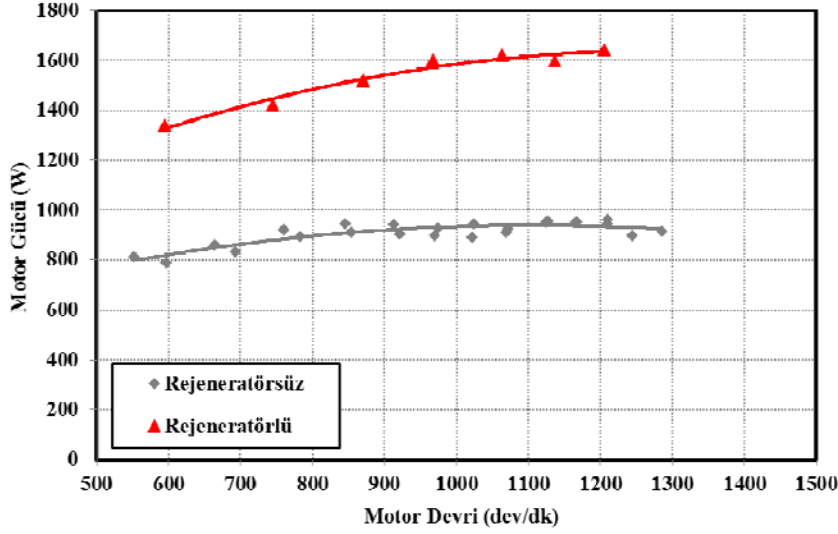
Rhombic hareket mekanizmalı motorda mekanik problemler giderildikten sonra rejeneratörsüz ve rejeneratörlü olarak motor performans testleri gerçekleştirilmiştir. Testler, çalışma akışkanı olarak helyum kullanılarak 800 ± 5 °C sıcak uç sıcaklığında ve 3 bar şarj basıncında gerçekleştirilmiştir. Motor soğutma suyunun debisi ve sıcaklığı kontrol altında tutularak sıcaklığın 27 ± 2 °C'de sabit kalması sağlanmıştır.

Şekil 4'de motor devrine bağlı olarak motor momentleri değişimleri görülmektedir. Maksimum motor momentleri rejeneratörsüz için 597 dev/dk motor devrinde 12,63 Nm ve rejeneratörlü için 595 dev/dk motor devrinde 21,49 Nm olarak elde edilmiştir. Düşük motor devirlerinde motor momentleri yüksek iken, motor devrinin artması ile motor momentleri azalmaktadır. Motor devri ısıtma-soğutma süresini etkilemektedir. Düşük motor devirlerinde ısıtma-soğutma süresi uzun iken, bu süre motor devrinin artması ile azalmaktadır. Bu nedenle düşük motor devirlerinde daha yüksek moment elde edilmiştir.



Şekil 4. Motor Devrine Bağlı Olarak Motor Momenti Değişimi

Şekil 5'de motor devrine bağlı olarak motor gücü değişimleri görülmektedir. Maksimum motor güçleri; rejeneratörsüz için 1265 dev/dk motor devrinde 962 W ve rejeneratörlü için 1062 dev/dk motor devrinde 1620 W olarak elde edilmiştir. Motor gücü motor hızının artmasına bağlı olarak belirli bir değere kadar artış göstermekte ve daha sonra azalmaktadır. Motor gücü motor devri ve motor momentine bağlı olarak değişim göstermektedir. Motor devrinin artmasına bağlı olarak ısı değişim süresinin azalması ve sürtünme kayıplarının artması motor gücünün azalmasına sebep olmaktadır. Rejeneratör kullanımı ile motor performansında belirgin bir artış gözlenmiştir.



Şekil 5. Motor Devrine Bağlı Olarak Motor Gücü Değişimi

Rejeneratörlü motorla elde edilen performans değerlerinin daha yüksek olması rejeneratör kullanımının ısı kazanımları artırdığının bir göstergesidir. Rejeneratör bölgesinde sabit hacimde sıcak bölgeden soğuk bölgeye geçiş yapan çalışma akışkanı sahip olduğu ısı enerjisinin bir bölümünü, rejeneratör malzemesine konveksiyonla vermektedir. Daha sonraki periyotta çalışma akışkanı soğuk hacimden sıcak hacme geçerken daha önce rejeneratör malzemesine bıraktığı ısı enerjisinin bir bölümünü tekrar üzerine alarak sıcak hacme geçmektedir. Rejeneratör de gerçekleşen bu ısı kazanımı çalışma akışkanına verilen ısı enerjisini ve dolayısı ile motor performansını artırmaktadır.

SONUÇ

Bu çalışmada, rhombic hareket iletim mekanizması sahip, beta tipi bir Stirling motorunun tasarımı, imalatı ve performans testleri yapılmıştır. Motor performansı üzerinde rejeneratörün etkisini incelemek amacı ile 60 cm³ bir rejeneratör kullanılmış ve rejeneratörün motor performansına etkisi araştırılmıştır. Deneyler 800 °C sıcak uç sıcaklığında ve 3 bar şarj basıncında gerçekleştirilmiştir.

Maksimum motor momentleri; rejeneratörsüz için 597 dev/dk motor devrinde 12,63 Nm ve rejeneratörlü için 595 dev/dk motor devrinde 21,49 Nm olarak elde edilmiştir. Maksimum motor güçleri ise; rejeneratörsüz için 1265 dev/dk motor devrinde 962 W ve rejeneratörlü için 1062 dev/dk motor devrinde 1620 W olarak elde edilmiştir. Rejeneratör kullanımı ile motor performansında % 70 artış elde edilmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, “113M192” numaralı TÜBİTAK projesi tarafından desteklenmiştir. Bu çalışmanın yazarları olarak katkılarından dolayı TÜBİTAK’a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Abuelyamen, A., Ben-Mansour, R., Abualhamayel, H., Mokheimer, E.M.A. (2017). Parametric Study on Beta-Type Stirling Engine. Energy Conversion and Management, 145, 53-63.

- Ahmadi, M.H., Nabakhteh, M.A., Ahmadi, M.A., Pourfayaz, F., Bidi, M. (2017). Investigation and Optimization of Performance of Nano-Scale Stirling Refrigerator Using Working Fluid as Maxwell–Boltzmann Gases. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 483, 337-350.
- Andersen, S.K., Carlsen, H., Thomsen, P.G. (2006). Numerical Study on Optimal Stirling Engine Regenerator Matrix Designs Taking into Account the Effects of Matrix Temperature Oscillations. *Energy Conversion and Management*, 47(7), 894-908.
- Barreto, G., Canhoto, P. (2017). Modelling of a Stirling Engine with Parabolic Dish for Thermal to Electric Conversion of Solar Energy. *Energy Conversion and Management*, 132, 119-135.
- Chen, W.L., Wong, K.L., Chen, H.E. (2014). An Experimental Study on the Performance of the Moving Regenerator for a γ -Type Twin Power Piston Stirling Engine. *Energy Conversion and Management*, 77, 118-128.
- Gheith, R., Hachem, H., Aloui, F., Ben Nasrallah, S. (2015). Experimental and Theoretical Investigation of Stirling Engine Heater: Parametrical Optimization. *Energy Conversion and Management*, 105, 285-293.
- Kadri, Y., Hadj Abdallah, H. (2016). Performance Evaluation of a Stand-Alone Solar Dish Stirling System for Power Generation Suitable for Off-Grid Rural Electrification. *Energy Conversion and Management*, 129, 140-156.
- Lee, J., Kim, J., Ok, Y.S., Kwon, E.E. (2017). Rapid Biodiesel Synthesis from Waste Pepper Seeds without Lipid Isolation Step. *Bioresource Technology*, 239, 17-20.
- Li, Z., Haramura, Y., Kato, Y., Tang, D. (2014). Analysis of a High Performance Model Stirling Engine with Compact Porous-Sheets Heat Exchangers. *Energy*, 64, 31-43.
- Mabrouk, M.T., Kheiri, A., Feidt, M. (2015). Effect of Leakage Losses on the Performance of a β Type Stirling Engine. *Energy*, 88, 111-117.
- Ng, J.H., Leong, S.K., Lam, S.S., Ani, F.N., Chong, C.T. (2017). Microwave-Assisted and Carbonaceous Catalytic Pyrolysis of Crude Glycerol from Biodiesel Waste for Energy Production. *Energy Conversion and Management*, 143, 399-409.
- Ni, M., Bingwei, S., Xiao, G., Peng, H., Sultan, U., Wang, S., Luo, Z., Cen, K. (2016). Improved Simple Analytical Model and Experimental Study of a 100W β -Type Stirling Engine. *Applied Energy*, 169, 768-787.
- Tanaka, M., Yamashita, I., Chisaka, F. (1990). Flow and Heat Transfer Characteristics of the Stirling Engine Regenerator in an Oscillating Flow. *JSME International Journal*, 33(2), 283-289.
- Yang, H.S., Cheng, C.H. (2017a). Theoretical Solutions for Power Output of Thermal-Lag Stirling Engine. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 111, 191-200.
- Yang, H.S., Cheng, C.H. (2017b). Development of a Beta-Type Stirling Engine with Rhombic-Drive Mechanism Using a Modified Non-Ideal Adiabatic Model. *Applied Energy*, 200, 62-72.