



Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi / Derleme Makale

Plakalı ve İç İçe Borulu İki Farklı Tip Isı Değiştiricinin Enerji ve Ekserji Analizi

 İrfan UÇKAN*,  Göksel GÜNDAL

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 65100, Van, Türkiye

*Sorumlu yazar e-posta : irfanuckan@yyu.edu.tr

Öz: Bu çalışmada, plakalı ve iç içe borulu ısı değiştiricilerinin enerji ve ekserji analizleri, farklı sıcak akışkan debilerinde (400 l/h, 500 l/h, 600 l/h) ve sabit soğuk akışkan debisinde (300 l/h) paralel akış koşulları altında deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel sonuçlarına göre, sıcak akışkan debisi arttıkça her iki ısı değiştiricide de soğuk akışkanın çıkış sıcaklığı artmıştır. Ekserji analizine göre, sıcak akışkan debisinin artması, her iki ısı değiştiriciden çıkan sıcak ve soğuk akışkanların ekserjilerini artırmıştır. 400 l/h sıcak akışkan debisinde plakalı ısı değiştiricide sıcak akışkanın çıkış ekserjisi 62.12 W iken, 600 l/h debide bu değer 79.22 W'a çıkmıştır. Aynı koşullarda iç içe borulu ısı değiştiricisinin ekserjisi de 400 l/h debisinde 81.35 W iken, 600 l/h debide 119.68 W'a yükselmiştir. Enerji verimliliği analizinde, sıcak akışkanın debisinin artırılmasıyla her iki ısı değiştiricinin birinci yasa verimliliğinde önemli bir artış gözlemlenmiştir. Sıcak akışkan debisi 600 l/h'e çıkarıldığında, iç içe borulu ısı değiştiricinin etkinliği %91'e ulaşırken, plakalı ısı değiştiricinin etkinliği %96'ya çıkmıştır. Ancak, ekserji verimlilikleri, enerji verimliliklerine kıyasla daha düşük bulunmuştur. İç içe borulu ısı değiştiricinin 400 l/h sıcak akışkan debisinde %44.4 olan ekserji verimi, plakalı ısı değiştiricide %41.25 olarak tespit edilmiştir. Yapılan çalışmada enerji ve ekserji verimleri arasında önemli farklar olduğu gözlemlenmiştir. Mühendislik uygulamalarında sistem analizlerinde enerji analizlerinin yanında ekserji açısından da analizlerin yapılması gerektiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Ekserji analizi, Entropi üretimi, Isı değiştirici, Termodinamik

Energy and Exergy Analysis of Two Different Heat Exchangers: Plate and Tube Heat Exchanger

Abstract: In this study, the energy and exergy analyses of plate and double-pipe heat exchangers were experimentally investigated under parallel flow conditions at different hot fluid flow rates (400 l/h, 500 l/h, 600 l/h) and a constant cold fluid flow rate (300 l/h). According to the experimental results, as the hot fluid flow rate increased, the outlet temperature of the cold fluid also increased in both heat exchangers. Based on the exergy analysis, increasing the hot fluid flow rate raised the exergy of both the hot and cold fluids exiting the heat exchangers. In the plate heat exchanger, for a hot fluid flow rate of 400 l/h, the exergy at the hot fluid outlet was 62.12 W, while at 600 l/h, it increased to 79.22 W. Under the same conditions, the exergy in the double-pipe heat exchanger rose from 81.35 W at 400 l/h to 119.68 W at 600 l/h. In the energy efficiency analysis, a significant increase in the first law efficiency of both heat exchangers was observed as the hot fluid flow rate increased. When the hot fluid flow rate reached 600 l/h, the effectiveness of the double-pipe heat exchanger reached 91%, while the plate heat exchanger reached 96%. However, exergy efficiencies were found to be lower compared to energy efficiencies. At a hot fluid flow rate of 400 l/h, the exergy efficiency of the double-pipe heat exchanger was 44.4%, while it was determined to be 41.25% in the plate heat exchanger. In the study, significant differences were observed between energy and exergy efficiencies. It was found that in engineering applications, system analyses should be conducted not only in terms of energy but also from an exergy perspective.

Keywords: Entropy production, Exergy analysis, Heat exchanger, Thermodynamics

Gönderilme Tarihi: 28.02.2025

Kabul Tarihi: 20.06.2025

Nasıl atf yapılır: Uçkan, İ., & Gündal, G. (2025). Plakalı ve iç içe borulu iki farklı tip ısı değiştiricinin enerji ve ekserji analizi. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 30(2), 708-718. <https://doi.org/10.53433/yyufbed.1648057>

1. Giriş

Isı değiştiriciler, enerji ve endüstriyel süreçlerde kritik öneme sahip ekipmanlardır ve pek çok mühendislik alanında geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Bu bağlamda, ısı değiştiricilerinin tasarımı, enerji verimliliği sağlamak adına hayati bir rol oynar. En verimli çalışmayı elde etmek için, bu cihazların tasarım ve işletme parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için, ısı değiştiricilerinin performansının güvenilir bir biçimde analiz edilebileceği etkin bir değerlendirme metodolojisine ihtiyaç duyulmaktadır. Bugüne kadar, ısı değiştiricilerinin etkinliğini ölçmek için başvurulan ana yöntem ekserji temelli değerlendirme yöntemidir.

Termodinamiğin birinci yasası, enerjinin miktarını korur ve enerjinin vardan yok edilemeyeceğini ifade eder. Bu ilke, enerji dönüşümlerinde toplam enerjinin sabit kalmasını sağlar. İkinci yasa ise enerjinin kalitesiyle ilgilenir ve özellikle enerji dönüşümleri sırasında enerjinin bozulmasını, entropi üretimini ve iş yapabilme kapasitesinin kaybını inceler. Bu yasa, sistemlerin geri döndürülemez süreçlere tabi olduğunu gösterir.

Dincer ve ark. (2004), ekserjinin önemli bir kavram olduğunu belirtmişlerdir, çünkü bu kavram, mühendislik sistemleri ile çevre arasındaki bağlantıyı kurar ve mühendislik sistemlerinin gerçek verimliliğini ifade eder. Bu özellik, ekserjiyi, sistemlerdeki iyileştirmeleri bulmak için faydalı bir araç haline getirir.

Farklı alanlarda kullanılan ısı değiştiricilerin performanslarını değerlendirmek için literatürde çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Leiner & Fiebig (1988), yüksek ısı transferi sağlayan ve sürtünme kayıplarını en aza indiren güneş hava ısıtıcılarının tasarımını ele almışlardır. Alamu ve ark. (2023), kümes hayvanı altlığı ve doğal gazın birlikte yakılması sürecinde kullanılan bir borulu ısı eşanjörünün ekserji ve enerji performansı incelemiştir. Deneysel ve simülasyon sonuçları, paralel hava ısıtıcı düzenlemesinin daha yüksek ekserji verimliliği sağladığını ve daha düşük ortam sıcaklıklarının ekserji verimliliğini artırdığını göstermiştir. Ayrıca, soğuk akışkan akış hızındaki artışın ekserji kaybını azalttığı ve verimliliği artırdığı, baca gazı akış hızındaki artışın ise ekserji kaybını artırdığı ve verimliliği azalttığı bulunmuştur. Reddy ve ark. (2002), atık ısı geri kazanım buhar jeneratöründe entropi üretimi üzerine bir çalışma sunmuşlardır. Fartaj ve ark. (2003), otomotiv klima sistemlerinin ikinci yasası ve ekserjisini teorik ve deneysel olarak incelemiştir. Kaliq & Kaushik (2004), reheat birleşik Brayton/Rankine güç döngüsünün termodinamik analizinde ikinci yasa yaklaşımını kullanmışlardır. Basınç oranı, döngü sıcaklık oranı, yeniden ısıtma sayısı ve döngü basınç düşüşünün birleşik döngü performans parametreleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Colorado (2017) tek kademeli bir absorpsiyonlu ısı transformatörünün gelişmiş ekserji analizi yapılmıştır. Ekserji yıkımına en yüksek katkıya sahip bileşenleri belirlemek için geleneksel bir ekserji analizi de yapılmıştır. Jeneratörün iyileştirilmesi en önemli öncelik olarak kabul edilirken, bunu emicinin, kondansatörün ve son olarak evaporatörün iyileştirilmesi izlemektedir. Bir bileşenle ilişkili verimsizliklerle ilgilenirken, bileşenden çıkan tüm malzeme akışkanlarının ekserjisinin ya ürün tarafında ya da yakıt tarafında dikkate alındığını kabul etmek gerekmektedir. Bu nedenle, bir bileşende tek ekserji kaybı, termal ekserjinin çevreye transferiyle (ısı kaybı) ilişkilidir.

Mahmud & Fraser (2002), iki paralel yüzey arasında sınırlı boşluğa sahip bir kanaldaki Newtonyen olmayan akışkanların akışı ve ısı transferinin birinci ve ikinci yasa çerçevesinde analitik incelenmesini yapmışlardır. Bu tür çalışmalar, akışkanların ısı transferi ve enerji dönüşüm süreçlerinde verimliliğin artırılması adına önemli bilgiler sunmaktadır. Tian ve ark. (2023) kriyojenik bir ORC sisteminin enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır. En uygun çalışma koşulları altında (100 kg/saat'te ısı emici akış hızı ve 45 °C'de ısı kaynağı sıcaklığı), sistem 1.02 kW net güç, %8.8 termal verim ve %22.5 soğuk enerji kullanım verimi elde etmiştir. Geleneksel ekserji analizine göre kondenser, en büyük ekserji yıkımına sahip bileşen olarak belirlenirken, gelişmiş ekserji analizine göre genişletici, iyileştirme için öncelikli bileşen olarak belirlenmiştir. Mazaheri & Fazli (2023), birleşik bir termoakustik soğutucunun performans optimizasyonu için ekserji tabanlı bir metodoloji sunmuştur. Termoakustik sistemin ana parametrelerini tahmin etmek için sayısal analiz yapılmış ve sistem performans katsayısı optimize edilmiştir. Her bir bileşen için optimum nokta bulunmuş ve tasarım parametrelerinin sistem performansını nasıl etkilediği gösterilmiştir. Son olarak, her bir soğutucu bileşenine kayıp mekanizmasının katkısını değerlendirmek için ekserji analizi yapılmış ve sistem optimizasyonu için bir yol haritası sunulmuştur. Boyutsuz ekserji kaybı kısmı adı verilen yeni bir parametre sunulmuştur.

Isı değiştiricilerin sınıflandırılmasında birçok parametre dikkate alınmaktadır. Dolayısıyla literatürde farklı tip ısı değiştiricilerin çalışma parametrelerinin bu ısı değiştiricilerin ekserjisi üzerinde

ki etkisini inceleyen çalışmalar yapılmıştır. [Ali ve ark. \(2025\)](#) yaptığı çalışmada, karşı akışlı konsantrik borulu ısı değiştiricilerinin ısı transferi, ekserji performansı ve toplam maliyetini çeşitli geometrik ve akış koşulları altında incelemektedir.

[Zeinali & Neshat \(2023\)](#), farklı geometrilerdeki spiral bobinli ısı eşanjörlerinin (SSCTHE) ekserji ve eksergoekonomik performansını incelemiştir. Sayısal sonuçlar, deneysel verilerle doğrulanmış ve geometrik parametrelerin (bobin adımı, spiral yarıçapı, vb.) ısı transferi, tersinmezlik ve maliyet üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Sonuçlar, ısı transferinin ekserji yıkımının ana kaynağı olduğunu ve geometrik değişikliklerin eşanjörün verimliliği ve maliyeti üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermektedir. Özellikle, bobin yarıçapındaki artışın verimliliği düşürdüğü ve maliyeti artırdığı bulunmuştur. [Prajapati ve ark. \(2024\)](#), kabuk ve borulu bir ısı eşanjörünün ekserji ve ısı ekserji analizlerini yapmışlardır. Analiz sonuçlarına göre, toplam ekserji yıkımının %97.5'inin önlenemez olduğu belirlenmiştir. Ekserji kayıplarının büyük kısmının ısı eşanjöründen kaynaklandığı ve ısı eşanjöründeki yüksek ekserji yıkımının, tasarım değişkenlerinin ve malzeme seçimlerinin optimize edilmesiyle büyük ölçüde azaltılabileceği ortaya konmuştur. Sonuç olarak, sistemin genel performansını artırmada en büyük iyileştirme potansiyelinin ısı eşanjöründe olduğu ve pompalar üzerinde yapılacak değişikliklere kıyasla daha etkili bir katkı sağlayacağı belirlenmiştir.

[Can ve ark. \(1999\)](#), çift tüplü ısı değiştiricisinin süreç değişkenlerinin ekserji kayıpları üzerindeki etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. [Bejan \(1988\)](#), gazdan-gaza uygulamaları için karşı akış ısı değiştiricilerinde sabit veya minimum sayıda entropi üretimi birimi için bir yöntem sunmuştur. Ayrıca, kanallardaki ısı transferi kaybı ve sürtünme basınç düşüşü ile bir ısı değiştiricisini incelemiş ve entropi üretimi sayısını kullanarak ısı değiştiricinin etkinliğini raporlamıştır.

[Gülenoğlu ve ark. \(2014\)](#) farklı plaka geometrilerine sahip üç contalı plakalı eşanjörün deneysel olarak karşılaştırmalı performansları incelemiştir. Deneyler, çeşitli plaka sayıları, farklı akış hızları ve giriş-çıkış sıcaklıkları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tüm plakalar için Reynolds sayılarının (300-5000) ve Prandtl sayılarının değiştiği 30 şevron açısı kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar kullanılarak Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü için plakaya özgü korelasyonlar elde edilmiştir. Sonuç olarak, farklı plaka geometrilerinin ısı ve hidrolik performansları karşılaştırılmış ve plakaya özgü korelasyonlar sunulmuştur. Enerji ve ekserji verimliliklerinin anlaşılması, enerji sistemlerini tasarlamak, analiz etmek, optimize etmek ve geliştirmek için uygun enerji politikaları ve stratejileri oluşturulmasında temel bir gerekliliktir. Bu tür politikalar ve stratejiler oluşturulduğunda, endüstriyel kazanların verimliliğini artırmak için birçok önlem alınabilir ([Kanoglu ve ark., 2005](#)).

Bu çalışmada, endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan plakalı ve iç içe borulu ısı değiştiricilerinin enerji ve ekserji performanslarını deneysel olarak karşılaştırmayı amaçlamaktadır. Farklı sıcak akışkan debilerindeki (400 l/h, 500 l/h, 600 l/h) paralel akış koşulları altında, her iki tip ısı değiştiricinin çıkış sıcaklıkları, enerji verimlilikleri, ekserji değişimleri ve entropi üretimleri incelenerek, sıcak akışkan debisinin değişimine bağlı olarak farklı tip ısı değiştiricilerin gösterdiği performanslar incelenmiştir. Bu karşılaştırmalı analiz, ısı değiştirici seçiminde ekserji analizinin önemini vurgulayarak, sistem optimizasyonu için termodinamik değerlendirmelerin kritik rolünü ortaya koymayı hedeflemektedir. Isı değiştirici seçim sürecinde mühendislere daha bilinçli kararlar almalarında yardımcı olmayı ve enerji verimliliğinin artırılmasına katkıda bulunmayı hedeflemektedir.

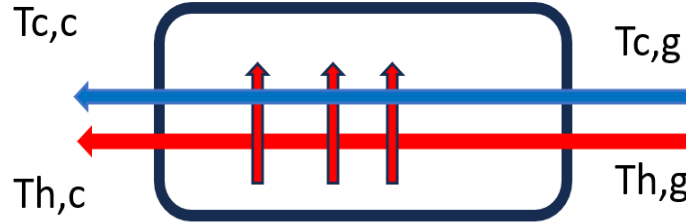
2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Laboratuvarında kurulan bir çoklu ısı değiştirici deney seti kullanılmıştır. Bu deney seti üzerinde bulunan plakalı tip ısı değiştirici ile iç içe borulu ısı değiştiricilerinin farklı çalışma parametreleri kullanılarak enerji ve ekserji yönünden analizleri yapılarak karşılaştırılması yapılmıştır. Her iki ısı değiştirici için paralel akış durumunda deneyler yapılmıştır. Bu çalışmada sıcak akışkan debisi 400 l/h, 500 l/h ve 600 l/h olarak ayarlanmıştır. Soğuk akışkan debisi de sabit tutularak 300 l/h için deneyler yapılmıştır. Sabit soğuk akışkan debisinde farklı sıcak akışkan debileri için ısı değiştiricilerinin çıkışlarındaki sıcaklık değişimleri ile enerji ve ekserji değişimleri incelenmiştir. Akışkan olarak sıcak tarafta yağ soğuk tarafta da şebeke suyu kullanılmıştır. Akışkanların debisini belirlemek için hem sıcak tarafta hem de soğuk tarafta rotametre bulunmaktadır. Soğuk ve sıcak akışkan debilerini ölçmek için şamandıralı tip debimetreler kullanılmıştır. Rotametrelere hata payı $\pm 2.3\%$ olarak hesaplanmıştır. Isı değiştiricilerinin giriş ve çıkış akışkan sıcaklıkları için daldırılabilir tip termokupllar borular içine yerleştirilerek veriler alınmıştır. K-tipi termokupllar, genellikle krom nikel

2.1. Enerji ve ekserji analizi

2.1.1. Isı değiştiriciden geçen ısı miktarı

Isı transferi gerçekleşirken, sıcak akışkandan ayrılan enerji, soğuk akışkan tarafından soğurulan enerjiye eşittir. Bu enerji miktarları, akışkanların kütleli debileri ile giriş ve çıkış entalpileri arasındaki fark kullanılarak belirlenebilir. Bu ilişki, enerji korunumuna dayanarak matematiksel olarak ifade edilebilir. Şekil 2'de bir ısı değiştiricide paralel akışın şematik görünüşü verilmektedir.



Şekil 2. Paralel akışlı ısı değiştiricilerde akışın şematik görünüşü.

Isı geçişi sonrası akışkanların değişen sıcaklıklarını hesaplayabilmek için transfer edilen ısı miktarı Denklem 1 ve Denklem 2 ile hesaplanabilmektedir.

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_g - h_c) \quad (1)$$

veya

$$\dot{Q} = \dot{m}_h C_{ph}(T_{hg} - T_{hc}) = \dot{m}_c C_{pc}(T_{cg} - T_{cc}) \quad (2)$$

Bu denklemlerde kullanılan h_g ve h_c ısı değiştiricisine giren ve çıkan akışkanların entalpisini göstermektedir. “h” ve “c” alt indisleri de sıcak ve soğuk akışkanlar için kullanılmıştır. \dot{m}_h ve \dot{m}_c sıcak ve soğuk akışkanların kütleli debisini belirtmektedir. C_{ph} ve C_{pc} sıcak ve soğuk akışkanların özgül ısılarını ifade etmektedir. Sıcaklıklarda T ile gösterilmiştir. Maksimum ısı transferi şu şekilde ifade edilir.

$$\dot{Q} = (\dot{m}C_p)_{min}(T_{hg} - T_{cg}) \quad (3)$$

Bir ısı eşanjörünün etkenliği, aktarılan ısı miktarının maksimum ısı transferine oranı olarak tanımlanır.

$$\eta_I = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{max}} \quad (4)$$

$$\eta_I = \frac{(mC_p)_c(T_{c,c} - T_{c,g})}{(mC_p)_{min}(T_{h,g} - T_{c,g})} = \frac{(mC_p)_h(T_{h,c} - T_{h,g})}{(mC_p)_{min}(T_{h,g} - T_{c,g})} \quad (5)$$

2.1.2. Ekserji analizi

Ekserji, çevreyle denge sağlanan ve tersinir bir süreç sonunda teorik olarak elde edilebilecek maksimum iş miktarıdır. Bu tanıma göre, ekserji hesaplamak için referans çevre koşullarının bilinmesi gereklidir. Bu çalışmada, referans çevre sıcaklığı ortam sıcaklığı olarak alınmıştır. Bir sistemin toplam ekserjisi E_x , dört bileşene ayrılabilir, bunlar;

- Fiziksel ekserji ($E_{x,ph}$),
- Kinetik ekserji ($E_{x,ke}$),
- Potansiyel ekserji ($E_{x,pe}$),
- Kimyasal ekserji ($E_{x,ch}$).

Sistemin toplam ekserjisi de aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$E_x = E_{x,ph} + E_{x,ke} + E_{x,pe} + E_{x,ch} \quad (6)$$

Bu durumda, kararlı bir açık sistemdeki ekserji dengesi şu şekilde yazılabilir

$$\sum \dot{E}x_g - \sum \dot{E}x_ç = \sum \dot{E}x_{\ddot{u}} \quad (7)$$

Yukarıdaki denklemde “g” ve “ç” indisleri sisteme giriş ve çıkış ekserjileri “ü” ise sistemde üretilen ekserjiyi ifade etmektedir.

Sıcak ve soğuk akışkanların ısı kapasiteleri ile kapasiteler arasındaki oranlar aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$C_h = \dot{m}_h c_{p,h} \quad (8)$$

$$C_c = \dot{m}_c c_{p,c} \quad (9)$$

$$C_o = \frac{C_{min}}{C_{max}} \quad (10)$$

Eğer sıcak akışkanın ısı kapasitesinin minimum olduğunu varsayarsak, ekserji kaybı şu şekilde yazılabilir (Dinçer ve ark., 2004).

$$\dot{E}x_{kaybı} = T_o [C_{min} \ln \left(\frac{T_{h,o}}{T_{h,g}} \right) + C_{max} \ln \left(\frac{T_{c,ç}}{T_{c,g}} \right)] \quad (11)$$

Isı eşanjöründe, sıcak akışkandan soğuk akışkana ısı aktarılırken, bu süreçte sistemdeki toplam entropi üretimi $S'_{\ddot{u}}$ şu şekilde hesaplanabilir,

$$S'_{\ddot{u}} = C_{min} \ln [1 + \varepsilon(T_R - 1)] + C_{max} \ln \left[1 - \varepsilon C_o \left(1 - \frac{1}{T_R} \right) \right] \quad (12)$$

Sıcak ve soğuk akışkanların, ısı değiştiricisine giriş ve çıkışlarda ekserjisini hesaplamak için aşağıdaki denklemler kullanılmıştır.

$$\dot{E}x_{h,g} = \dot{m}_{h,g} c_{p,h} [(T_{h,g} - T_o) - T_o \ln \left(\frac{T_{h,g}}{T_o} \right)] \quad (13)$$

$$\dot{E}x_{h,ç} = \dot{m}_{h,ç} c_{p,h} [(T_{h,ç} - T_o) - T_o \ln \left(\frac{T_{h,ç}}{T_o} \right)] \quad (14)$$

$$\dot{E}x_{c,g} = \dot{m}_{c,g} c_{p,c} [(T_{c,g} - T_o) - T_o \ln \left(\frac{T_{c,g}}{T_o} \right)] \quad (15)$$

$$\dot{E}x_{c,ç} = \dot{m}_{c,ç} c_{p,c} [(T_{c,ç} - T_o) - T_o \ln \left(\frac{T_{c,out}}{T_o} \right)] \quad (16)$$

Isı değiştiricilerin ekserji verimleri de aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

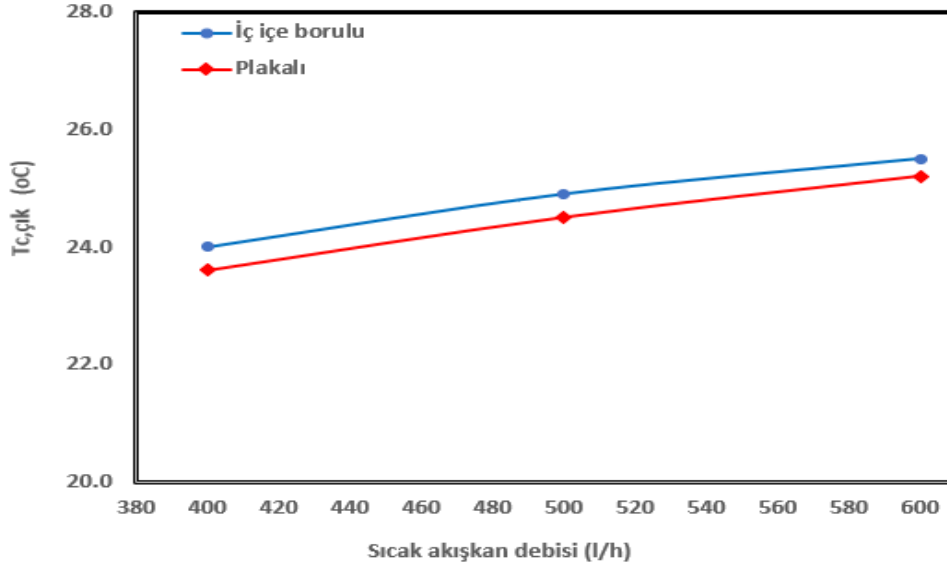
$$\eta_{II} = \left(\frac{\dot{E}x_{h,out} + \dot{E}x_{c,out}}{\dot{E}x_{h,in} + \dot{E}x_{c,in}} \right) 100 \quad (17)$$

3. Bulgular

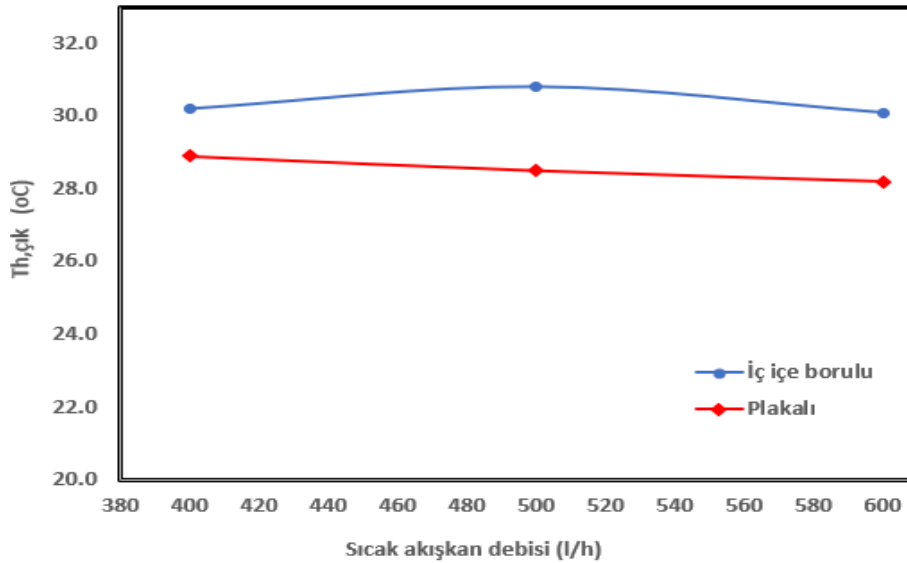
Farklı sıcak akışkan debileri için plakalı ve iç içe borulu ısı değiştiricilerin çıkış sıcaklığındaki değişimler Şekil 3' te verilmiştir. Her iki ısı değiştirici içinde sıcak akışkan debileri artırıldığı zaman ısı değiştiricilerinin çıkışlarındaki soğuk akışkanın sıcaklığı da artmaktadır. Plakalı ısı değiştiricisinde

400 l/h sıcak akışkan debisinde çıkan soğuk akışkan sıcaklığı 23.60 °C olarak ölçülürken, iç içe borulu ısı değiştiricisinde 24 °C olarak ölçülmüştür. Aynı şekilde hem 500/l/h hem de 600l/h debileri içinde iç içe borulu ısı değiştiricisini soğuk akışkan çıkış sıcaklıklarının plakalı ısı değiştiriciye göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir. İki ısı değiştirici için sıcak akışkanların ısı değiştiricilerin çıkışındaki sıcaklık değişimleri Şekil 4'te verilmiştir. Her iki ısı değiştiricideki sıcak akışkanların sıcaklıkları farklı sıcak akışkan debilerinde ısı değiştiricilerini terk ederken sıcaklıklarında azalma meydana gelmektedir. Fakat aynı sıcak akışkan debilerinde iç içe borulu ısı değiştiricilerin sıcaklıklarının plakalı ısı değiştiricisindeki sıcak akışkan çıkış sıcaklığından daha yüksek olduğu gözlenmiştir. 400l/h sıcak akışkan debisinde iki ısı değiştirici arasındaki sıcaklık farkının 1.3 °C iken 600l/h sıcak akışkan debisinde 2 °C' ye yakın bir sıcaklık farkı meydana gelmiştir.

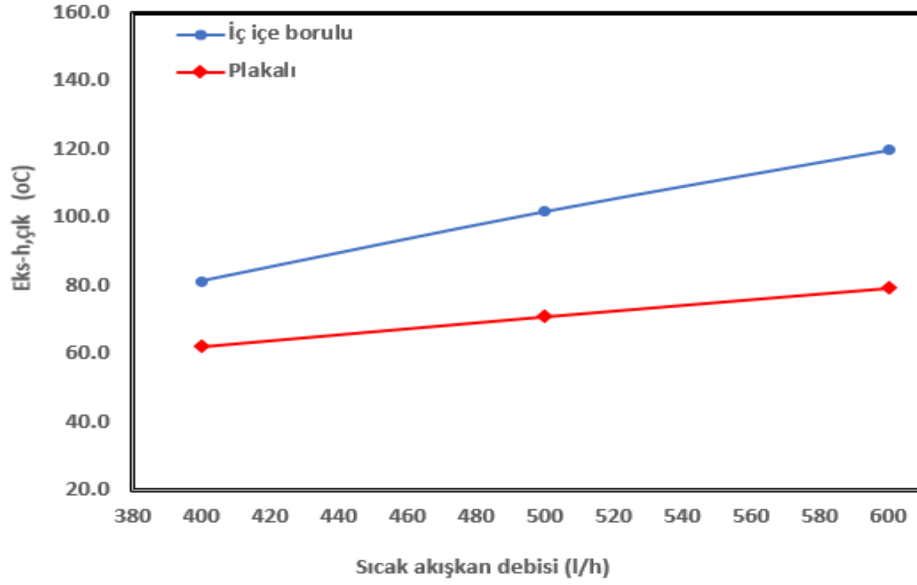
Sıcak akışkan debisinin sıcak akışkan çıkış ekserjisine etkisi Şekil 5'te verilmiştir. Sıcak akışkanın debisini artırmanın her iki ısı değiştiricide de akışkanın çıkış ekserjilerinin artmasına neden olmaktadır. 400l/h sıcak akışkan debisinde plakalı ısı değiştiricide sıcak akışkanın çıkış ekserjisi 62.12 W iken 600l/h debide bu akışkanın ekserjisi 79.22W değerine kadar çıkmaktadır. Aynı koşullarda iç içe borulu ısı değiştiricisinin de ekserjisinin arttığı gözlenmiştir. 400l/h debisinde 81.35W olan akışkan ekserjisi, 600l/h debide 119.68W değerine kadar artmaktadır.



Şekil 3. Sıcak akışkan debisinin soğuk akışkan çıkış sıcaklığına etkisi.

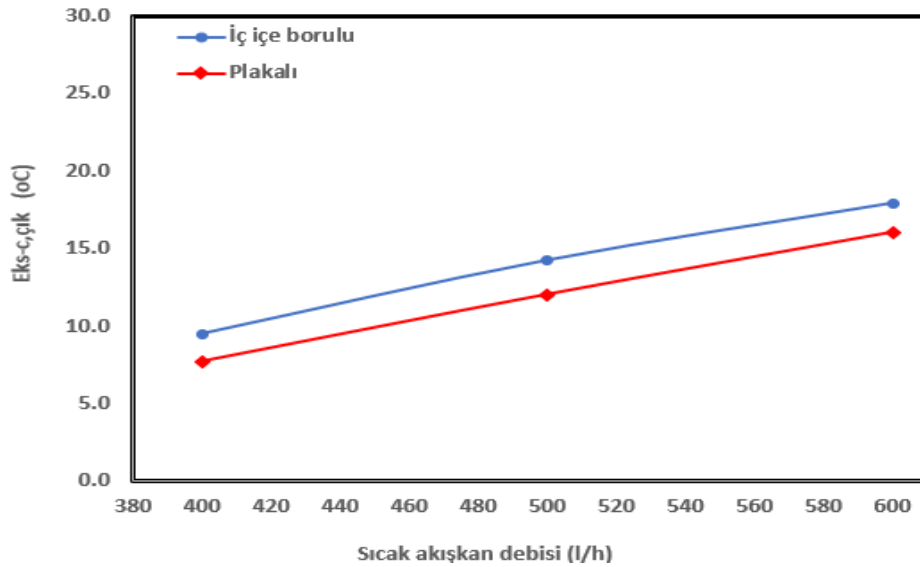


Şekil 4. Sıcak akışkan debisinin sıcak akışkan çıkış sıcaklıklarına etkisi.



Şekil 5. Sıcak akışkan debisinin sıcak akışkan çıkış ekserjisine etkisi.

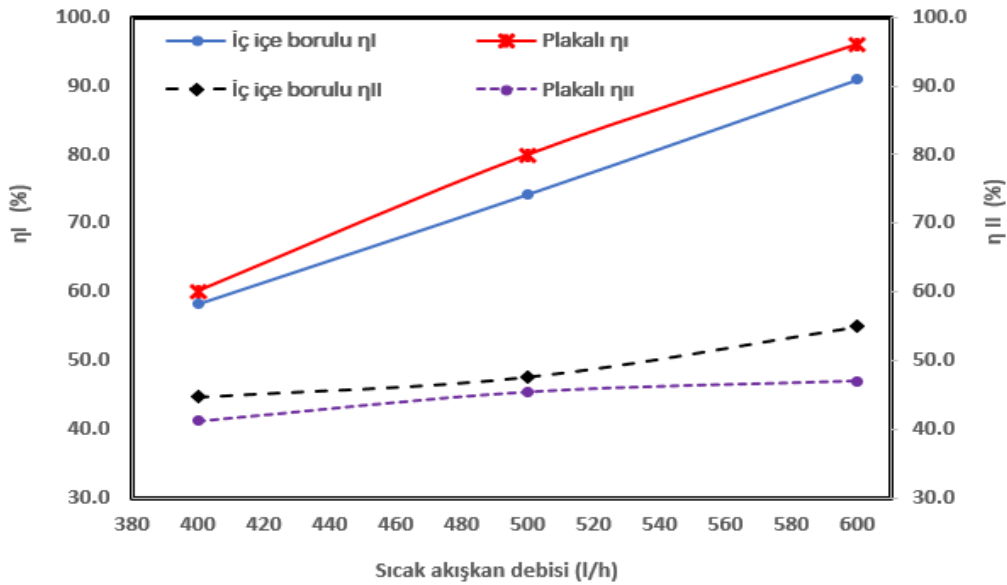
Şekil 6'da ısı değiştiricileri terk eden soğuk akışkanların ekserjilerindeki değişim verilmektedir. Sıcak akışkan debisinin artmasının her iki ısı değiştiricinin soğuk akışkanların ekserjisi üzerinde de etkisinin olduğu gözlenmiştir. Farklı sıcak akışkan debilerinde yapılan deneylerde iç içe borulu ısı değiştiricinin çıkışındaki soğuk akışkanın ekserjisinin daha fazla olduğu görülmüştür. En yüksek ekserjinin 600l/h'te iç içe borulu ısı değiştirici için 17.93W iken plakalı ısı değiştiricisi için 16W olduğu görülmüştür.



Şekil 6. Sıcak akışkan debisinin soğuk akışkan çıkış ekserjisine etkisi.

Sıcak akışkan debisindeki değişimin ısı değiştiricilerinin enerji (η_I) ve ekserji verimleri (η_{II}) üzerindeki etkisi Şekil 7'de verilmektedir. Sıcak akışkanın debisinin artırılmasına bağlı olarak her iki ısı değiştiricisinin birinci yasa veriminde önemli bir biçimde artışı gözlenmiştir. 400 l/h debide iç içe borulu ısı değiştirici verimi %58 iken plakalı ısı değiştirici verimi ise %60'dır. Sıcak akışkan debisi 600l/h değerine çıkarıldığında iç içe borulu ısı değiştiricinin etkenliği %91'lik bir değere ulaşırken plakalı ısı değiştiricinin etkenliği de %96'ya kadar çıkmaktadır. Her iki ısı değiştirici içinde mevcut çalışma parametrelerine göre enerji verim değerlerinin %35'in üzerinde bir artış olduğu görülmüştür. Bu ısı değiştiricilerinin ikinci yasa verimlerine bakıldığında birinci yasa veriminden oldukça düşük

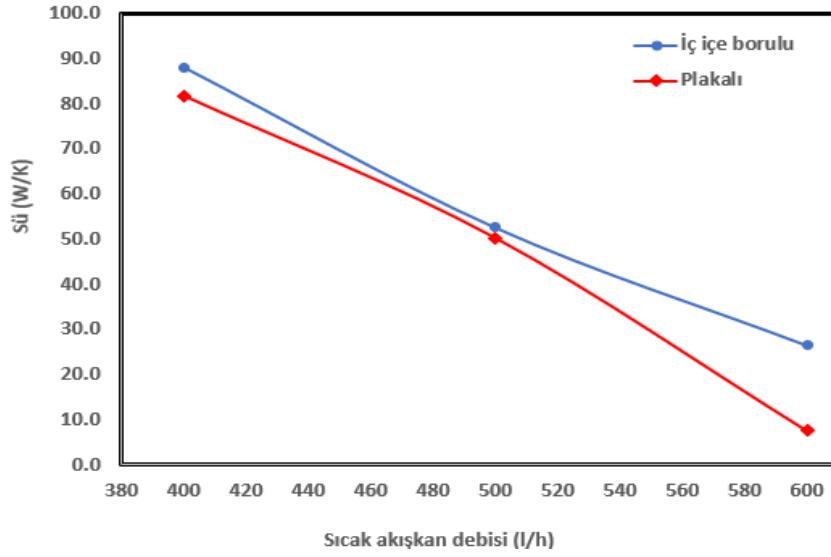
değerler elde edildiği gözlenmektedir. İç içe borulu ısı değiştiricinin 400 l/h sıcak akışkan debisinde %44.4 iken plakalı ısı değiştiricisinin ekserji verimi %41.25 olarak tespit edilmiştir. Bu debide her iki ısı değiştiricinin enerji verimleri ile karşılaştırıldığında ekserji verimlerinin daha düşük olduğu anlaşılmaktadır. Benzer fark diğer sıcak akışkan debilerinde de görülmektedir. Sıcak akışkan debisi 600l/h değerine gelirken iç içe ve plakalı ısı değiştiricilerin ekserji verimleri sırasıyla %54.98 ve %47 olarak değişim göstermektedir. Ekserji verimi, bir sistemdeki enerji kalitesinin ne kadarının işe dönüştürülebildiğinin bir ölçüsüdür. Enerji verimi ise sadece enerjinin ne kadarının transfer edildiğini gösterir, kalitesini dikkate almaz. Bu nedenle, ekserji verimleri enerji verimlerinden daha düşüktür çünkü ısı transferi sürecinde bir miktar enerji kaybolur veya daha doğru bir ifadeyle, enerjinin kullanılabilirliği azalır. Ekserji verimi, termodinamik bir sistemde bulunan enerjinin, iş yapabilme kapasitesine sahip olan kısmının bir ölçüsüdür. Enerji verimliliğinden farklı olarak, ekserji verimliliği, enerji dönüşüm süreçlerindeki tersinmezlikleri ve kayıpları da dikkate alır. Bu nedenle, bir sistemdeki iyileştirme potansiyelini belirlemek ve enerji kullanımını optimize etmek için daha kapsamlı bir metrik sunar. Bu bilgiler, ısı değiştirici tasarımının optimizasyonu, akışkan akış düzenlemelerinin iyileştirilmesi ve malzeme seçimlerinin değerlendirilmesi gibi mühendislik kararlarında kritik rol oynar. Ekserji verimlerinin enerji verimlerinden düşük çıkmasının sebepleri arasında basınç, sürtünme, ısı kayıpları gibi birçok tersinmezlik temel faktör olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 7. Sıcak akışkan debisinin ısı değiştiricilerindeki verimlere etkisi.

Isı değiştiricilerindeki entropi üretiminin sıcak akışkanın debisiyle değişimi Şekil 8'de verilmektedir. Entropi üretiminin sıcak akışkanın debisiyle önemli bir şekilde azaldığı görülmektedir. Entropi üretiminin azalmasının akışkanların ekserjisi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Plakalı ve iç içe borulu ısı değiştiricileri karşılaştırıldığında, farklı sıcak akışkan debilerinde plakalı ısı değiştiricide oluşan entropi üretiminin, iç içe borulu ısı değiştiriciye göre daha az olduğu görülmüştür. En yüksek entropi üretimi, 400 l/h debisinde plakalı ısı değiştiricide 81.78 W, iç içe borulu ısı değiştiricide ise 88.14 W olarak ölçülmüştür. Her iki ısı değiştiricide de mevcut çalışma koşullarında entropi azalmasının %70'in üzerinde olduğu görülmüştür.

Etkinlik, teorik olarak mümkün olan maksimum ısı transferiyle ilgili olduğu için ısı değiştirici tasarımında önemli bir parametredir. Verim, ısı değiştiricinin gerçek enerji kayıplarını ve ikinci yasa kayıplarını içerir. Bir ısı değiştiricinin etkinliği yüksek olabilir, ancak verimi düşük olabilir. Farklı çalışma parametreleri hem verim hem de etkinlik üzerinde önemli etkiye sahiptir.



Şekil 8. Sıcak akışkan debisinin entropi üretimine etkisi.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışma, plakalı ve iç içe borulu ısı değiştiricilerinin enerji ve ekserji performanslarını, farklı sıcak akışkan debileri ve sabit soğuk akışkan debisi koşullarında deneysel bir yaklaşımla incelemiştir. Elde edilen bulgular, ısı değiştirici tasarım ve işletme stratejilerine yönelik önemli çıkarımlar sunmaktadır. Deneysel sonuçları, sıcak akışkan debisindeki artışın, her iki ısı değiştirici tipinde de soğuk akışkanın çıkış sıcaklığında yükselişe neden olduğunu göstermiştir. Bu durum, akışkan debisinin artmasıyla birlikte konvektif ısı transferinin artması ve dolayısıyla ısı değiştiricilerdeki termal performansın iyileşmesiyle ilişkilendirilebilir. Bu bulgu, literatürdeki diğer deneysel ve sayısal çalışmalarla tutarlılık arz etmekte olup, akışkan debisinin ısı transferi üzerindeki etkisini teyit etmektedir (Ali ve ark., 2025).

Sıcak akışkan debisindeki artışın, ısı değiştiricilerden çıkan akışkanların ekserji değerlerini artırdığını ortaya koymuştur. Bu durum, artan akışkan debisiyle birlikte sistemdeki kullanılabilir enerji potansiyelinin arttığını göstermektedir. Enerji verimliliği analizinde, sıcak akışkan debisinin artırılmasıyla her iki ısı değiştiricide de birinci yasa verimliliğinde kayda değer bir artış gözlemlenmiştir. Bu sonuç, artan akışkan debisinin enerji kullanım etkinliğini olumlu yönde etkilediğini desteklemektedir. Bununla birlikte, ekserji verimliliklerinin (ikinci yasa verimliliği), enerji verimliliklerine kıyasla daha düşük değerlerde bulunması, sistemlerdeki entropi üretimi ve tersinmezliklerin enerji kalitesi üzerinde yarattığı olumsuz etkiyi vurgulamaktadır. Dolayısıyla, enerji sistemlerinin optimizasyonunda ekserji analizinin kritik rolünü ortaya koymaktadır.

Isı değiştirici tipleri arasında yapılan karşılaştırmada, plakalı ısı değiştiricilerin birinci yasa verimliliği daha yüksek olmasına rağmen, ikinci yasa verimliliği iç içe borulu ısı değiştiricilere göre daha düşük bulunmuştur. Bu bulgu, plakalı ısı değiştiricilerin enerji kullanımında daha etkin olmalarına karşın, ekserji yıkımı ve tersinmezlikler açısından iç içe borulu ısı değiştiricilere kıyasla daha dezavantajlı olduğunu göstermektedir. Isı değiştirici seçiminde sadece enerji verimliliğinin değil, aynı zamanda ekserji verimliliğinin de dikkate alınmasının önemini vurgulamaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma, ısı değiştirici performansının değerlendirilmesinde enerji ve ekserji analizlerinin bütünlük bir şekilde kullanılmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Farklı mühendislik uygulamalarında, ısı değiştirici seçiminde ekserji temelli optimizasyon yaklaşımları, enerji kaynaklarının daha verimli kullanılmasına ve sistemlerin sürdürülebilirliğine önemli katkılar sağlayabilir.

Teşekkür

Bu yayının Göksel GÜNDAL'ın Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda tamamlanmış olan yüksek lisans tez çalışmasından hazırlanmış olup,

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FYL-2022-9922 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir. Destekleyen kurum ve kuruluşlara teşekkür ederiz.

Kaynakça

- Alamu, S. O., Lee, S. W., & Qian, X. (2023). Exergy and energy analysis of the shell-and-tube heat exchanger for a poultry litter co-combustion process. *Processes*, 11(8), 2249. <https://doi.org/10.3390/pr11082249>
- Ali, S., Nohra, C., El Achkar, G., Faraj, J., & Khaled, M. (2025). Heat transfer, exergy, and cost: A sustainable analysis of concentric tube heat exchangers. *Case Studies in Thermal Engineering*, 68, 105833. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.105833>
- Bejan, A. (1988). *Advanced engineering thermodynamics*. New York: Wiley.
- Can, A., Eryener, D., & Buyruk, E. (1999). Experimental studies on influence of process variables to the exergy losses at the double tube heat exchanger. In: S. Kakaç, A. E. Bergles, F. Mayinger, & H. Yüncü (eds) *Heat transfer enhancement of heat exchangers* (pp. 641-648). Nato ASI Series, vol 355. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-015-9159-1_34
- Colorado, D. (2017). Advanced exergy analysis applied to a single-stage heat transformer. *Applied Thermal Engineering*, 116, 584-596. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.01.109>
- Dincer, I., Hussain, M. M., & Al-Zaharnah, I. (2004). Analysis of sectoral energy and exergy use of Saudi Arabia. *International Journal of Energy Research*, 28(3), 205-243. <https://doi.org/10.1002/er.962>
- Fartaj, A., Ting, D. S. K., & Yang, W. W. (2003). Second law analysis of the transcritical CO₂ refrigeration cycle. *Energy Conversion and Management*, 45(13), 2269-2281. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.07.001>
- Gulenoglu, C., Akturk, F., Aradag, S., Uzol, N. S., & Kakac, S. (2014). Experimental comparison of performances of three different plates for gasketed plate heat exchangers. *International Journal of Thermal Sciences*, 75, 249-256. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2013.06.012>
- Khaliq, A., & Kaushik, S. C. (2004). Second-law based thermodynamic analysis of Brayton/Rankine combined power cycle with reheat. *Applied Energy*, 78(2), 179-197. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2003.08.002>
- Kanoglu, M., Isik, S. K., & Abusoglu, A. (2005). Performance characteristics of a diesel engine power plant. *Energy Conversion and Management*, 46(11-12), 1692-1702. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2004.10.005>
- Leiner, K. A., & Fiebig, M. (1988). Second law optimization of flat-plate solar air heaters Part I: The concept of net exergy flow and the modeling of solar air heaters. *Solar Energy*, 41(2), 127-132. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(88\)90128-4](https://doi.org/10.1016/0038-092X(88)90128-4)
- Mahmud, S., & Fraser, R. A. (2002). Thermodynamic analysis of flow and heat transfer inside channel with two parallel plates. *Exergy, An International Journal*, 2(3), 140-146. [https://doi.org/10.1016/S1164-0235\(02\)00062-6](https://doi.org/10.1016/S1164-0235(02)00062-6)
- Mazaheri, K., & Fazli, M. (2023). Exergy-based methodology to develop design guidelines for performance optimization of a coupled co-axial thermoacoustic refrigerator. *International Journal of Thermofluids*, 20, 100451. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100451>
- Prajapati, P., Raja, B. D., Savaliya, H., Patel, V., & Jouhara, H. (2024). Thermodynamic evaluation of shell and tube heat exchanger through advanced exergy analysis. *Energy*, 292, 130421. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130421>
- Reddy, B. V., Ramkiran, G., Ashok Kumar, K., & Nag, P. K. (2002). Second law analysis of a waste heat recovery steam generator. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(9), 1807-1814. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(01\)00293-9](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(01)00293-9)
- Tian, Z., Chen, X., Zhang, Y., Gao, W., Chen, W., & Peng, H. (2023). Energy, conventional exergy and advanced exergy analysis of cryogenic recuperative organic rankine cycle. *Energy*, 268, 126648. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126648>
- Zeinali, S., & Neshat, E. (2023). Energy, exergy, economy analysis and geometry optimization of spiral coil heat exchangers. *Case Studies in Thermal Engineering*, 42, 102708. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102708>