

2021

Integration of the Kalina Cycle in a Tanker Ship and Analysis of its Effect on Energy Efficiency

Erkin Yücel

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY

Begüm Doganay

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY

Fikret Gökalp

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY

Nihat Baycık

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY

Yalçın Durmuşoğlu

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY

Follow this and additional works at: <https://commons.yildiz.edu.tr/seatific>

Recommended Citation

Yücel, Erkin; Doganay, Begüm; Gökalp, Fikret; Baycık, Nihat; and Durmuşoğlu, Yalçın (2021) "Integration of the Kalina Cycle in a Tanker Ship and Analysis of its Effect on Energy Efficiency," *Seatific Journal*: Vol. 1: Iss. 1, Article 4.

<https://doi.org/10.14744/seatific.2021.0004>

Available at: <https://commons.yildiz.edu.tr/seatific/vol1/iss1/4>

This Research Article is brought to you for free and open access by YTU Press. It has been accepted for inclusion in Seatific Journal by an authorized editor of YTU Press.



Seatific

<https://seatific.yildiz.edu.tr>

DOI: <https://doi.org/10.14744/seatific.2021.0005>

Seatific

Research Article

Kalina çevriminin bir tanker gemisine entegrasyonu ve geminin enerji verimliliğine etkisinin analizi

Erkin YÜCEL^{ID}, Begüm DOĞANAY^{ID}, Fikret GÖKALP^{ID}, Nihat BAYCIK^{ID},
Yalçın DURMUŞOĞLU^{*ID}

İstanbul Teknik Üniversitesi Denizcilik Fakültesi, Gemi Makineleri İşletme Mühendisliği Bölümü, Tuzla, İstanbul

ARTICLE INFO

Article history

Received: 10 December 2021

Accepted: 27 December 2021

Key words:

Heat recovery; Energy efficiency;
Kalina cycle; Turbo-generator;
Fuel saving

Anahtar kelimeler:

Atık ısı geri dönüşümü; Enerji
verimliliği; Kalina çevrimi;
Turbo Jeneratör; Yakıt tasarrufu

ABSTRACT

In terms of energy efficiency, one of the main methods to avoid waste of resources is to utilize waste heat energies. The Kalina cycle is used as a bottom cycle in many areas and is used for the generation of electrical energy from waste heat energy. About 90% of world trade is carried out by sea transport. For this reason, the recovery of waste heat released into the atmosphere from ships is great importance in terms of both global pollution and energy efficiency. In this study, the recovery of waste heat energy from the exhaust gas at a temperature of 240°C and a flow rate of 43.93 kg/s, which is currently released to the atmosphere in a real heat-power combined cycle on a tanker ship, is evaluated. In the study, unlike the traditional method, Kalina cycle was used for energy recovery of waste heat. For this purpose, the Kalina cycle is considered instead of the Rankine cycle system on an M/T tanker ship. With the designed system, it has been observed that an efficiency increase of approximately 30% has been achieved. While the net power obtained from the cycle is around 550 kW, it remains within the limits of 420 kW in the Rankine cycle. At the same time, an annual fuel saving of 610.18 tons and a thermal efficiency increase of 4.8% were calculated with the Kalina cycle.

ÖZ

Enerji verimliliği açısından kaynak israfının önüne geçilebilecek ana yöntemlerden biri atık ısı enerjilerinden yararlanmaktır. Kalina çevrimi birçok alanda bir alt çevrim olarak kullanılarak atık ısı enerjisinden elektrik enerjisi üretimi için kullanılmaktadır. Dünya ticaretinin yaklaşık %90' ı deniz taşımacılığı ile yapılmaktadır. Bu nedenle gemilerden atmosfere salınan atık ısıların geri kazanımı hem küresel kirlilik hem de enerji verimliliği açısından büyük bir önem arz etmektedir. Bu makalede bir tanker gemisindeki gerçek bir ısı-güç kombine çevriminde mevcut durumda atmosfere salınmakta olan 240°C sıcaklıktaki ve 43.93 kg/s debideki egzoz gazındaki atık ısı enerjisinin geri kazanımı değerlendirilmiştir. Çalışmada atık ısının enerjisinin geri kazanımı için geleneksel yöntemden farklı olarak, Kalina çevriminden yararlanılmıştır. Bu amaç için bir M/T tanker gemisinde Rankine çevrimi ile çalışan sistem yerine Kalina çevrimi düşünülmüştür. Tasarlanan sistem ile yaklaşık %30 bir verim artışı sağlandığı görülmüştür. Çevrimden elde edilen net güç 550 kW civarında iken Rankine çevriminde 420 kW sınırlarında kalmaktadır. Aynı zamanda Kalina çevrimiyle yıllık 610.18 ton yakıt tasarrufu ve %4.8'lik bir ısı verim artışı hesaplanmıştır.

*Corresponding author.

*E-mail address: ydurmusoglu@itu.edu.tr



Published by Yıldız Technical University Press, İstanbul, Turkey

Copyright 2021, Yıldız Technical University. This is an open access article under the CC BY-NC license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

Cite this article as: Yücel E, Doğanay B, Gökalp F, Baycik, Durmuşoğlu Y. Kalina çevriminin bir tanker gemisine entegrasyonu ve geminin enerji verimliliğine etkisinin analizi. Seatific 2021;1:1:26–36.

GİRİŞ

Son yıllarda aşırı olarak yaşanan doğal afetlerden dolayı dünya insanlığı ve diğer paydaş canlılar ölümcül tehdit altındadır. Sebebi küresel iklim değişikliğine bağlanan bu olaylar karşısında bilim dünyası acil çözümler arayışı içerisinde. An itibarıyla önerilen çözümlerin başında yenilenebilir enerji kaynakları gelmektedir. Bunun yanında mevcut enerji kaynaklarının da verimli tüketilmesi gerekli görülmektedir. Enerji verimliliği açısından kaynak israfının önüne geçilebilecek ana yöntemlerden biri de atık ısı enerjilerinden yararlanmaktır. Endüstriyel, ulaşım, imalat sanayi hatta konutlar enerji verimliliği açısından katkı sağlaması beklenen sektörlerdir. Dünya ticaretinin yaklaşık %90' ı deniz taşımacılığı ile yapılmaktadır. Bu nedenle gemilerden atmosfere salınan atık ısıların geri kazanımı hem küresel kirlilik hem de enerji verimliliği açısından büyük bir önem arz etmektedir.

Gemilerde atık ısı enerji geri kazanımı amacıyla yaygın olarak Rankine güç çevrimi bir alt çevrim olarak kullanılmakta ve Turbo-jeneratörler yardımıyla elektrik enerjisi üretilmektedir. Fakat, bu çevrim özellikle düşük sıcaklıkta uygulamalarda, iş akışkanı olarak su kullanıldığından dolayı birçok yönden yetersiz kalmaktadır. Bundan dolayı alternatif çevrimler tercih edilmektedir. Kalina çevrimi, alt çevrim olarak önerilen güç çevrimlerinden biridir.

Kalina döngüsü aynı sıcaklık ve basınç koşullarında, Rankine çevrimine göre daha yüksek bir atık ısı enerji geri kazanımı oranıyla çalışmaktadır. Kalina çevriminde sistemde dolaşan iş akışkanı su yerine amonyak-su ($\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$) karışımı kullanılarak birim kütle başına geri kazanılan enerjinin artırılması amaçlanmaktadır. Amonyak-su karışımının en belirgin karakteristik özelliği faz değişimlerinin sabit sıcaklıkta olmamasıdır. Bu sayede oldukça yüksek verimliliklerde çalışabilmektedirler. Literatürde oldukça çok sayıda Kalina çevrimli sistemlerin farklı amaçlar için çalışıldığı görülmektedir.

C. J. Bliem (1988), yüksek sıcaklıklarda çalışan jeotermal tesislerinde enerji geri dönüşümü için Kalina çevriminden yararlanarak sistem performansı incelenmiştir. Çevrimde jeotermal sıcaklığı 149-232°C aralığında iken, Kalina çevriminde türbine giriş sıcaklığı 538-565°C aralığında olduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak Kalina çevriminin atık ısı enerjisinden yararlanmak amacıyla güvenle kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

A. Kalina ve ark. (1996), jeotermal tesisler için Kalina çevrimi ile ilgili son gelişmelerden söz ettikleri çalışmalarında, farklı uygulama yöntemleri ile çevrimin avantaj ve

dezavantajlarına vurgu yapmışlar. Yüksek ekserji verimliliği, birim kütle başına güç yoğunluğunun yüksek olması, düşük sıcaklıklarda bir çok probleme çözüm olabilmesi Kalinanın avantajları olarak belirtilmiştir.

Henry A. Mlcak (1996), dünyada yaygın olarak kullanılan enerji üretimi ve enerji geri kazanım sistemlerinin karşılaştırmalı performans analizini çalışmışlar. Kalina çevrimi kullanılarak tasarlanacak sistemlerin öneminden ve avantajlarından bahsetmiştir. Kalina çevriminde kullanılacak olan amonyak-su karışımının getireceği avantajları diyagramlarla göstermiş ve sistemin endüstride çokça tercih edilen Rankine gibi çevrimlere kıyasla daha avantajlı olduğuna işaret etmişlerdir.

Nag ve Gupta (1997), ısı kaynağı olarak gaz türbini egzozuyla bir Kalina Çevrimi'nin ekserji analizini gerçekleştirmişler. Çevrim verimliliğini etkileyen önemli parametrelerin türbin giriş sıcaklığı, karışımın konsantrasyon oranı ve separator (ayırıcı) sıcaklığı olduğu sonucuna vurgu yapmışlar.

E. Thorin ve ark. (1998), dört farklı amonyak-su konsantrasyonuna sahip karışım üzerinde yaptıkları çalışmada, Kalina Çevrimi için ısı verimliliklerdeki farklılıkların %0.5 ile 3.3 arasında değiştiğini bulmuşlar. 20 MPa basınçta doymuş buhar entalpisinde %100'e kadar artış olduğunu vurgulamışlar.

Kaita, (2001), yüksek sıcaklıklardaki LiBr çözeltilerinin termodinamik özelliklerini hesaplayan modeller geliştirmiş ve ağırlıkça % 40-65 ve ayrıca 40-210oC sıcaklık aralığındaki çözelti için kullanmıştır. Sonuç olarak geliştirdiği modelin üçlü etkili LiBr-su soğutucuların modellenmesinde yararlı olacağını belirtmiştir.

P. Bombarda ve ark. (2009), Kalina çevrimi çalışma sıvısı olarak amonyak-su kullanan bir absorpsiyon güç çevrimi ile ısı enerjisi kayıplarının azaltılmasına çalışmışlar. Isı kaynağı ile çalışma akışkanı akımı arasındaki logaritmik ortalama sıcaklık farkını en aza indirerek bunun sağlanabileceğini belirtmişler. Bu amaçla ikili evrimden yararlanmışlar ve alt çevrim olarak Organik Rankine çevrimini (ORC) kullanmışlar. Çalışma sonucunda Kalina sistemi, tek ve çift basıncılı alt çevrimdeki kritik ORC sisteminden sırasıyla yaklaşık %45 ve %25 daha fazla güç elde edildiğini ortaya çıkarmışlar, fakat aynı çıktı için Kalina Çevrimi'nin daha yüksek türbin giriş basıncı gerektirdiğini ifade etmişler.

Ogriseck (2009), ısı ve güç üretiminin olduğu kombine bir tesiste atık ısıdan faydalanmak için kullanımı yaygın olmayan Kalina Çevrimi'ni entegre etmiş ve sistemin termodinamik analizini gerçekleştirmiştir. Analiz sonucunda Kalina Çevrimi'nin soğutma suyu sıcaklığı ve amonyak-su

karişımı oranına bağılı olarak %12.3-%17.1 arasında olduğu ve sisteme 2.3 MW'lık bir ısı girişı ile 320 kW-440 kW arasında elektrik üretimi sağılandığını ileri sürmüştür.

Ganesh ve Srinivas (2011), Amonyak-su karişımının yüksek basınç değerlerinde termodinamik hesaplarını yapabilecek bir simülasyon modeli geliştirmişler ve termodinamik özellikleri hesaplamak için Matlab' da kodlama yaparak termodinamik özelliklerin hızlı bir şekilde hesaplanmasını sağılamışlardır.

Patel ve diğ., (2012) tek aşamalı LiBr-su absorbsiyonlu soğutma sisteminde, kaynatıcı ve kondenser çıkış sıcaklığının, kaynatıcı ve absorber üzerindeki ısı yüküne etkilerini araştırmışlar. Buna göre, kondenser ve kaynatıcı çıkış sıcaklığı arttıkça STK'nın kademeli olarak azalmaya başladığını, ancak ekserji veriminin önce kondenser çıkış sıcaklığındaki artışla arttığını ve daha yüksek kondenser çıkış sıcaklığında düşmeye başladığını bulmuşlardır.

U. Larsen ve ark. (2013), Kalina Çevriminin, amacına uygun olarak, büyük gemi makinelerinin egzoz atıkları için de kullanılabileceğini söylemişlerdir. Özellikle Amonyak-su karişım sıvısının izotermal olmayan faz değişim karakteristikleri yüksek verimliliğe neden olduğundan gemilerde kullanımı uygun bulunmuş ve yapılan çalışma ile Kalina Çevrimine rejenerasyon uygulanarak mevcut sistemin ısı verimini %3-5 arasında arttırılabileceğini ifade etmişlerdir.

Wang ve ark. (2013), Kalina Çevrimi ile ORC çevrimlerini ekonomik kriter bakımından kıyaslama yapmış ve Kalina Çevrimi'nin ORC'dan %15 daha düşük bir maliyetle ısı verimde artış sağılandığını göstermişlerdir. Kalina Çevriminin termodinamik ve ekonomik performansını çok amaçlı bir algoritma kullanarak optimize edilmiş ve geliştirdikleri bu modelin çalışmalarda güvenle kullanılabileceği sonucuna varmışlardır.

Francesco Baldi ve Cecilia Gabriellii (2014), dünyada enerji verimliliği ve atık enerji geri kazanıma verilen önemden bahsetmişler ve denizcilik sektörünün dünyada enerji kullanımının en yoğun olduğu sektörlerden birisi olduğunu söyleyerek, bir gemiye ait atık ısı geri kazanımı sisteminin kurulumu ve fizibilite analizini gerçekleştirmek için bir metodoloji açıklamışlardır. Kurulan sistem aynı zamanda örnek bir gemiye uygulamışlardır.

C. Y. Guo ve ark. (2015), düşük kaynama noktasına sahip organik kimyasal akışkan kullanan ORC sistemi atık ısıdan faydalanarak enerji geri kazanımı için alternatif yöntemlerden biri olmasına rağmen hem organik akışkanın pahalı olması hem de bazı organik akışkanların ozon tabakasına zarar verdiğini iddia ederek, Kalina Çevriminin daha çevre si ve daha ekonomik olduğunu vurgulamışlardır.

Hanna Mergner ve Thomas Weimer (2015), Sistem akışkanı olarak R245fa kullanan ORC'yi ve Kalina'yı (KCS-34) enerji verimliliklerine göre kıyaslamışlardır. Çalışmada kullanılan buharlaştırıcı ısı kaynağı sıcaklığı 120.15 °C'iken, Kalina

sisteminin ORC sistemine göre ortalama %25 oranında daha fazla enerji verimli olduğunu vurgulamışlar.

Arash Nemati ve ark. (2016), CGAM kojenerasyon sisteminde atık ısı geri kazanımı için bir alt çevrim olarak, organik Rankine çevriminin (ORC) ve Kalina çevriminin (KC) avantajları ve dezavantajlarını karşılaştırmak için bir termodinamik modelleme ve optimizasyon gerçekleştirilmişler. Kombine CGAM / ORC ve CGAM / KC sistemleri için termodinamik modeller uygulanmış ve bazı etken değişkenlerinin kombine sistemlerin enerji ve ekserji verimliliği ve türbin boyutu parametresi üzerindeki etkileri araştırılmışlar. Sonuç olarak, ORC'nin daha basit tasarımı na rağmen, Kalina çevrimin daha yüksek net güç ürettiğini ayrıca Kalina çevriminin ORC'ye göre daha küçük türbin boyutlarına gerek duyduğunu ortaya çıkarmışlar.

Yufei Wang ve ark.(2017) çalışmalarında organik rankine ve kalina çevrimini Aspen Hysys yazılımında geliştirilen simülasyon modeline göre iki ayrı çevrim şeklinde hesaplanmış ve karşılaştırılmışlar. Yaptıkları çalışmada maksimum besleme sıcaklığı olarak 180 °C' de olan atık ısı için Kalina çevriminin ORC'den %0.2 daha verimli olduğunu hesaplamışlar.

N. S. Ganesh ve T. Srinivas (2019), düşük sıcaklıklı Kalina çevrim sistemi (LTKCS) ve yüksek sıcaklıklı Kalina çevrim sistemi (HTKCS) ile parametrik bir çalışma yapmışlar. LT-KCS, güneş enerjisinden gelen sıcak kaynak enerjisini kullanırken, HTKCS için sıcak enerji akışı, basınçlı su nükleer reaktöründen alarak, çıktı ve verimlilik (enerji, ekserji ve bağılı), analizlerinde bir dizi sınırlar belirlemişlerdir. LT-KCS ve HTKCS için, ayırıcı (seperatör) sıcaklığı ve türbine giren konsantrasyon için optimum çalışma koşulları olarak sırasıyla 110–150°C, 60–100°C ve 0.85-0.97, 0.50-0.80 aralığını tespit etmişlerdir. Sonuç olarak, HTKCS' den yüksek özgül güç (675 KW) ve düşük ekserji kayıpları için LTKCS (%74) optimum ekserji verimliliği elde edildiğini vurgulamışlardır. Enerji geri kazanımlarının en çok

Bing Hu ve ark. (2019), değişken amonyak-su karişımı oranlarına göre sistemdeki diğer parametrelerin değişimlerini bulmak ve çıkan sonuçları karşılaştırmak istemişler. Öncelikle değişken amonyak-su kütlesi ile birim kütle başına net güç değişimleri ve enerji verimliliğini hesaplamışlar. Konsantre çözeltide amonyak oranının artmasıyla, hem elektrik enerjisi veriminin hem de ısı verimliliğin azalmaya başladığı ve çözeltinin konsantrasyonu % 35 olduğunda en düşük seviyeye ulaştığını hesaplamışlar. Değişken soğutma suyu sıcaklığı ile birim akışkan kütlesi başına net güç değişimleri ve enerji verimliliği hesaplanarak, soğutma kaynağının sıcaklığı ne kadar düşükse, yoğunlaşma sıcaklığı ve emme basıncının da o kadar düşük olduğunu görmüşler.

Hayder A. Dhahad ve ark. (2019), Atık ısı ile çalışan bir Kalina çevrimini ürün maliyet ilişkisi üzerine bir ekonomik model çalışmışlar. Termodinamik ve termoeconomik analizler Engineering Equation Solver (EES) programı kul-

lanılarak gerçekleştirilmiş. Parametrik analiz, artan jeneratör kaynama noktası sıcaklık farkının, net gücün, toplam birim maliyete etkisi ile ilgili önemli sonuçları tartışmışlar.

Yıldız Koç ve Hüseyin Yağlı (2020), atık ısıdan enerji geri kazanımı için kombine ısı-güç çevrimi adına bir metot olan Kalina çevrimi tasarlamışlar ve çevrimi termodinamiğin birinci ve ikinci kanun yönünden termodinamik analizini yapmışlar. Çalışma sonucunda, maksimum ekserji yıkımının buharlaştırıcıda görüldüğünü, Kalina çevriminin enerji verimi ve ekserji verimlerinin sırasıyla yaklaşık %12 ve %27 olduğunu hesaplamışlardır.

Merve Şentürk Acar (2020) jeotermal enerjiyle çalışan Kalina Çevrimi'nin optimum tasarım parametrelerinin belirlenmesi için termodinamik ve ekonomik analizler yapmıştır. Çalışmada türbin giriş basıncı, buharlaştırıcıdaki jeotermal akışkan çıkış sıcaklığı, yoğunlaştırıcı basıncı ve amonyak kütle sistem parametreleri olarak kabul edilmiştir. Ayrıca çevrimin ekonomik analizini de gerçekleştirmiştir. Çalışmanın sonucu olarak, sistemdeki toplam ekserji yıkımı % 66.5 olarak en çok evaporatörde görüldüğünü vurgulamış ayrıca sistemde enerji ve ekserji verimliliği sırasıyla % 13.04 ve % 51.81 olarak belirtilmiştir. Ayrıca bu sistemin net bugünkü değeri 119.377 Milyon ABD\$ olarak hesaplanmış ve ekonomik açıdan yatırımın uygun olduğu gösterilmiştir.

Zheng, S. ve ark. (2021) Paralel ve çift basınçlı yeni bir Kalina çevrim önerisi yapmışlar. Akışkan çiftinin konsantrasyon oranları ve buharlaştırıcı basıncı optimize edilmiş ayrıca sistemin ekonomik analizi de gerçekleştirilmiştir.

Zheng, S. ve ark. (2021), atık ısı enerjisi geri dönüşümünde Kademeli Kalina çevrimi için dirsek temas noktası sıcaklığı ile ilgili yeni bir matematiksel model geliştirmişler. Modellerinde kullanılan iş akışkanının proses hesaplarında izotermal olmayan bir ısı geçişi kabulü yapmışlardır.

Yapılmış olan literatür çalışmaları ayrıntılı olarak incelendiğinde atık ısı kaynaklarının enerji geri kazanımı için daha çok organik Rankine çevrimlerinin tercih edildiği görülmektedir. Fakat her ne kadar Kalina çevrimleri endüstride daha az uygulama alanına sahip olsa da, birçok konuda ORC çevrimlerinden daha üstün özelliklere sahip olduğu yapılan çalışmalar ışığında görülmektedir. Dahası, literatür çalışmalarında bir gemi üzerindeki ısı-güç kombine çevrimlerinin atık enerjisinin geri kazanımı üzerine çok az sayıda çalışma bulunduğu da dikkate alındığında çalışmanın özgün bir çalışma olabileceği öngörülmüştür. ,

Bu çalışmada bir M/T tanker gemisinin egzoz kazanından atmosfere salınan atık ısı enerjisinden enerji geri dönüştürbilmek için Kalina çevrimi bir alt çevrim olarak düşünüldü. Çevrimi oluşturan tüm sistem bileşenlerinin termodinamik analizleri gerçekleştirildi. Sonuç itibarıyla Kalina çevriminin diğer enerji geri kazanımın yöntemlerden daha verimli olduğu görülmüştür. Bununla birlikte ilk yatırım maliyetlerinin de düşük olduğu düşünüldüğünde sistemin gemiler için entegrasyonunun mümkün olduğu maliyet, çevre ve performans bakımından büyük avantajlarının da bulunduğu anlaşılmaktadır.

MATERYAL VE METHOT

Model Tanker Gemisinin Özellikleri

K-Sim Motor MAN B&W 5L90MC VLCC 11-V modeli, sabit ve kontrol edilebilir pervane ile modellenen itiş ünitesi olarak MAN B&W yavaş hızlı turbo şarjlı dizel motor ile çok büyük bir ham taşıyıcı simüle eder. Ana motor modeli, gemi modelinin çalışma ve koşullarındaki değişikliklere dinamik olarak yanıt verir ve gemi modeli, ana motor modeline karşılıklı olarak yanıt verir. Model, simülasyonun dinamik davranışını gerçek motor yanıtına yakın yapan

Tablo 1. Örnek tanker gemisinin verileri

Model özellikleri ve detayları	
Gemi Tipi	VLCC
Gemi Boyu	305 m
Gemi Eni	47 m
Draft	30,4 m
Tonaj	187997 dwt
Ana Makine	MAN B&W 5L90 MC VLLCC L11-V
Ana Makine Gücü	17400 kW
Hız	14 knots
Silindir Çapı	900 mm
Silindir Sayısı	5
Piston Stroku	290 mm
Maksimum hız	74 rpm
Süpürme Havası Basıncı	2,1 bar
Ortalama İndike Basınç	13 bar
Özgül Yakıt Tüketimi	168 g/kWh

Tablo 2. Model tanker gemisi baca kazanı ve rankine çevrimi verileri

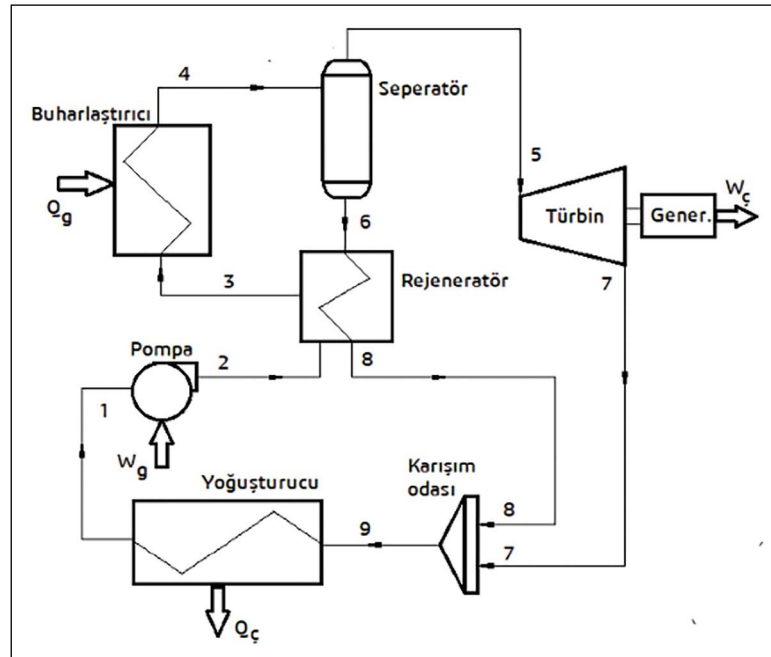
Parametreler	Ana Makine Yükleri			
	100 %	75 %	50 %	25 %
Türbin Giriş Sıcaklık [K]	506,94	489,94	502,7	487,42
Türbin Çıkış Sıcaklık [K]	302,70	302,68	302,72	302,14
Türbin Giriş Entalpi [kJ/kg]	2916,12	2880,03	2908,3	2874,01
Türbin Çıkış Entalpi [kJ/kg]	2316,82	2300,47	2313	2297,1
Türbin Giriş Basıncı [bar]	7,81	7,79	7,81	7,85
Türbin Çıkış Basıncı [bar]	0,04	0,04	0,04	0,04
Türbin Buhar Debisi [kg/h]	3480,54	3457,03	3430,8	3043,23
Türbin Çıkış Kuruluk %	0,9	0,9	0,9	0,89
M/E Hızı [rpm]	74	67	49	29,60
M/E Egzoz Debisi [t/h]	174,60	132,60	68	37,45
Egzoz Baca Giriş Sıcaklığı [K]	513,32	496	504	496,09
Egzoz Baca Çıkış Sıcaklığı [K]	507,08	459,7	461	464,24
Buhar Debisi [t/h]	3,53	3,53	3,5	3,1

gerçek motor verilerine dayanmaktadır. Elektrik santrali 2 dizel jeneratör, bir turbo jeneratör, bir şaft jeneratör / motor ve bir 180 kW acil durum jeneratörü içerir. Buhar tesisi, D tipi buhar kazanı, egzoz kazanı, 4 kargo türbini, balast türbini ve yoğuşturucu ve besleme suyu sistemleri içerir.

Gemi tipi olarak tanker seçilmesinin nedeni fakültemizde K-Sim Motor MAN B&W 5L90MC VLCC 11-V model tanker tipi gemiye ait simülasyon bulunması ve bu simülasyon kullanılarak en gerçekçi sonuca ulaşmak istenmesidir. Bunun yanı sıra tankerlerde atık ısı oluşumu fazladır ve dünya deniz ticaretinde tanker tipi gemi sayısında şu an olduğu gibi ilerleyen zamanlarda da artış olacağı öngörülerek tanker tipi geminin seçilmesinin daha faydalı olacağı da

düşünülmüştür. Model tankerin özellikleri ile ilgili veriler Tablo 1’de gösterilmiştir.

Model tankerin baca kazanı ekonomizer, evaporator ve kızgın buhar üretmek için süperhit boru demetlerinden oluşmaktadır. Egzoz gazları bu boruların dış tarafından, Rankine çevrimindeki iş akışkanı boruların içerisinden geçmektedir. Kızgın buhar halinde su buharı basit buhar çevrimli türbine sevk edilmektedir. Türbinde genişleyen su buharı sayesinde yapılan iş türbinin şaftına iştirakli olan jeneratör yardımıyla elektrik enerjisine dönüşmektedir. Sisteme ait tüm veriler Tablo 2’de, basit Rankine çevrimi tesis şeması Şekil 1’de gösterilmiştir.

**Şekil 1.** Tasarlanan Kalina çevrim modeli.

Kalina Güç Çevrimi

Kalina çevrimi Dr. Alexander Kalina tarafından geliştirilen ve termodinamik olarak dünyanın en verimli güç çevrimi teknolojilerinden biridir. Bu sistem, Rankine çevriminde yaygın olarak kullanılan su gibi saf bir madde yerine, çalışma sıvısı olarak %70 amonyak-%30 su karışımı kullanır (Amonyak-su oranı sistemdeki diğer parametreler doğrultusunda değişkenlik gösterebilir). Kalina çevrimi prensibiyle çalışan sistemlerde sıkıştırma için pompa, genişleme ve tahrik için türbin, çevrime ısı çekimi için evaporatör, evaporatörden çıkan buharda kalan sıvı parçacıklarını ayırtmak için separatör, ısı verimliliği artırmak içinde alçak sıcaklık, yüksek sıcaklık rejeneratörü ve son olarak çevrimden ısı atımını sağlamak için kondenser bulunur. Tipik bir Kalina çevrimi Şekil 2' de verilmiştir.

Çevrimin Çalışma Prensibi

Amonyak-su karışımı bir pompa yardımıyla depolama tankından çekilir ve daha önce hesaplanmış optimum basınçta devreye pompalanır (1-2). Karışım pompadan sonra ilk olarak rejeneratörden geçirelerek, seperatörden dönen içerisinde kullanılabilir ısı enerjisi bulunan sıvıyla ısıtılır (2-3). Rejeneratörün sistemdeki asıl amacı buharlaştırıcının işini azaltmak ve atık durumda bulunan ısıyı kullanarak sistem verimini arttırmaktır. Rejeneratörden buharlaştırıcıya gelen karışım buharlaştırıcıda, ana makine tarafından üretilen egzoz gazının içerisindeki atık ısıyla buharlaştırılır (3-4). Buharlaştırıcıdan çıkan gazda az da olsa su tanecikleri bulunur. Bu tanecikleri ayırtmak için buharlaştırılan amonyak-su karışımı seperatöre gönderilir. Seperatörde zengin amonyak-su buharı ve zayıf sıvı karışımı ayrıştırılır. Zayıf sıvı karışımı yüksek sıcaklık rejeneratörüne verilerek tekrar buharlaşması amaçlanır (4-6). Elde edilen zengin amonyak-su buharı ise türbine gönderilerek iş elde edilir (5-7). Türbinden çıkan buhar, karışım odasında rejeneratörden geri dönen sıvı fazdaki akışkanla karıştırılır (7-8-9). Karışım odasından sıvı-buhar olarak her iki fazda da çıkan karışım, sistemde tekrar kullanıma hazır sıcaklığa ve tamamıyla sıvı faza geçmesi amacıyla yoğunlaştırucuya gönderilir. Yoğunlaştırucuda soğutucu akışkan yardımıyla yoğunlaştırulan istenilen sıcaklığa ve faza getirilen karışım çevrimi tekrarlamak için pompaya geri döner (9-1).

Sistemde dolaşan amonyak ve su doğada bulunan en yaygın bileşiklerden biridir. İlk kurulum maliyeti için önemli bir avantaj sağlar. Her ikisinin de çevreye herhangi bir zararı yoktur. Susuz amonyak yanıcıdır ancak tutuşması zordur. Amonyak, ateşleme kaynağı çekildikten sonra yanmayı desteklemez. Amonyak atmosfer basıncında gazdır. Havadan kütleye daha hafiftir bu sayede herhangi bir kaçak kolaylıkla fark edilebilir. Amonyak, insan sağlığı için tehlikeli bir gazdır ve oda sıcaklığında gaz halinde bulunur. Amonyak ve su karışımı aşındırıcı bir malzemedir, bu nedenle

bu karışımla sürekli temas halinde kullanılacak olan metallerin belirlenmiş bazı güvenlik testlerinden geçmesi gerekir. Amonyak zehirli bir gaz olduğu için sistem kaçağına karşı yüksek güvenlik standartlarını sağlayan bir koruma sağlamak gereklidir. Bu da ilk kurulum maliyetinde artışa neden olur. Amonyak, uygun şekilde kullanıldığında ekolojik olarak güvenli bir endüstriyel kimyasaldır. Nispeten zararsız bileşikler oluşturmak için su ve karbondioksit ile kolayca birleşir. Havadaki asidik kirleticileri nötralize ederek çevreye fayda sağladığı yapılan bilimsel çalışmalarla saptanmıştır. Rankine çevriminin çalışma sıvısına kıyasla, amonyak-su karışımlarının toksisitesi, muhtemelen gemi makine dairelerinde ek güvenlik önlemlerinin kullanılmasını gerektirecektir. Kalina çevriminde kullanılan amonyak halihazırda deniz soğutma uygulamalarında ve gemideki seçici katalitik indirgeme tesislerinde NOx emisyonlarının azaltılmasında kullanılmaktadır. Amonyak-su karışımları doğaldır Yang ve ark. tarafından araştırılan ORC soğutucu akışkan sıvılarına kıyasla çevreye nispeten daha düşük olumsuz etkilere sahiptir. Ayrıca, U. Larsen ve ark. yaptıkları çalışmada ORC'lerde çalışma akışkanı olarak sadece düşük tehlikeye sahip ve çevre dostu akışkanlar tercih edilirse, verimliliğin termodinamik olarak optimum çözümden çok daha düşük olduğu gösterilmiştir. Kalina çevriminin en önemli avantajlarından biri kaynama ve yoğunlaşma noktalarının sabit basınç altında sadece karışımdaki amonyak oranı değiştirilerek artırılıp azaltılabilmesine olanak sağlamasıdır. Bu sayede çevrim birçok beklentiye özel olarak tasarlanıp Rankine gibi birçok popüler sisteme kıyasla daha yüksek verimler alınabilir. Amonyak-su karışımı donmaz. Bu sayede düşük sıcaklıklar altında çalışan sistemler için başlıca seçim sebeplerinden biri. Karışımdaki amonyak-su oranı değiştirilerek, karışımın buharlaşma ve yoğunlaşma sıcaklığı gibi parametreler değiştirilebilir. Kalina çevrimi bu özelliği sayesinde ek bir sisteme de daha ihtiyaç duymadan ihtiyaca özel olarak tasarlanabilir.

Amonyak ve suyun moleküler ağırlığı çok yakındır (Amonyak:17, Su:16). Bu nedenle Kalina çevrimiyle çalışan sistemlerde geleneksel eksenel akışlı buhar türbinleri kullanılabilir. Rankine çevrim tesislerindeki türbinler vakum altında bir kondensere, Kalina çevrim tesisleri ise basınç altında bir kondensere egzoz yapar. Bu fark, türbindeki egzoz akış alanının boyutunda belirli hacimlerde büyük bir fark yaratır ve türbinin çevrimde yaptığı iş artar. Amonyak-su hidrokarbonlardan daha yüksek ısı transfer oranlarına sahiptir. Isı değiştiricilerinin boyutu bu nedenle daha küçük ve daha az maliyetli olacaktır. İkincisi, hidrokarbon sıvıları amonyak-sudan daha yüksek moleküler ağırlıklarına sahiptir. Bu nedenle, amonyak-su karışımı önemli ölçüde düşük akış hızlarında bile eşit güç çıkışları üretir.

Çevrimin Termodinamik Analizi

Rejeneratörlü Kalina çevriminin termodinamik hesapları için Tablo 1 ile gösterilmiş olan model kullanılacaktır. Sürekli akışlı açık sistemler için termodinamiğin 1.kanun

ifadesi, kütlenin korunumu ve ısı verim ifadeleri sırasıyla aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$\sum \dot{Q} + \sum \dot{W} + \sum \dot{m}_g h_g - \sum \dot{m}_\zeta h_\zeta = 0 \quad (1)$$

$$\sum \dot{m}_g - \sum \dot{m}_\zeta = 0 \quad (2)$$

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_g} = 1 - \frac{\dot{Q}_\zeta}{\dot{Q}_g} \quad (3)$$

Çevrimde yer alan tüm komponentler için enerjinin ve kütlenin korunumu prensipleri uygulanarak termodinamik ifadeler türetilmiştir.

Pompa

Doymuş sıvı haldeki zengin karışımın yüksek basınca ulaştırma ve yoğunluğu (ρ), akışkan kütle debisi ($\dot{m}$) bilinen bir akışkan, çalışma basınçları (P_1, P_2) ve adyabatik verimi (η_p) olan pompanın enerji ve kütle dengesi aşağıdaki denklemlerle hesaplanır:

$$\dot{W}_p = \dot{m}v(P_2 - P_1)/\eta_p \quad (4)$$

$$\dot{W}_p = \dot{m}(h_2 - h_1)/\eta_p \quad (5)$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (6)$$

Rejeneratör

Rejeneratör, seperatör çıkışından gelen yüksek sıcaklıklı akışkan taşıdığı yüksek ısı enerjisinin bir kısmını buharlaştırıcıya girmek üzere olan akışkana, gövde borulu ve karşı akışlı ısı değiştirici ile aktarır. Hesaplamalarda rejeneratörden ortama olan ısı kaybı ihmal edilmiştir. Buna göre rejeneratör için enerji ve kütle dengesi ifadeleri

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_8 \quad (7)$$

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_3 \quad (8)$$

$$(\dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_2 h_2) - (\dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_3 h_3) = 0 \quad (9)$$

şeklindedir.

Buharlaştırıcı

Çevrimde dolaşan $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ zengin karışımı buharlaştırıcıda yüksek sıcaklıklara kadar dışarıdan sağlanan bir ısı kaynağı yardımıyla ısıtılmaktadır. Isı kaybının olmadığı kabul edilen buharlaştırıcı için enerji ve kütle dengeleri şu şekilde verilmiştir:

$$\dot{Q}_g + \dot{m}_3(h_4 - h_3) = 0 \quad (10)$$

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 \quad (11)$$

Seperatör

Buharlaştırıcıda yüksek sıcaklıkta çıkan zengin karışım iki fazlıdır. Seperatörde sıvı faz ve buhar faz birbirlerinden ayrılır

ve yüksek saflık oranıyla buhar fazındaki amonyak gazı türbine giderken, karışımın geri kalanı yüksek sıcaklığından dolayı alt taraftan rejeneratöre geçmektedir. Buna göre seperatör için enerji ve kütle dengesi aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_5 + \dot{m}_6 \quad (12)$$

$$\dot{m}_4 h_4 = \dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_6 h_6 \quad (13)$$

Türbin

Seperatörden buhar fazında gelen amonyak gazı bu noktada yüksek enerjisi düzeyindedir. Türbinde genişlemek suretiyle bir enerji üretimi gerçekleşmektedir. Bu enerji jeneratör tarafından elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Isı kaybının olmadığı kabul edilen türbinin adyabatik verimi η_T olduğuna göre enerji ve kütle dengesi ifadesi aşağıdaki gibi yazılır:

$$\dot{W}_T = \dot{m}_5(h_5 - h_7)\eta_T \quad (14)$$

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_7 \quad (15)$$

Karışım odası

Seperatörden ve türbinden dönüş yapan iş akışkanları karışım odasında tekrardan birleşerek, başlangıç kütlelerine çıkış noktasında ulaşmaktadır. Karışım odasından ısı kaybının olmadığı kabul edilerek enerji ve kütle dengesi aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\dot{m}_9 = \dot{m}_8 + \dot{m}_7 \quad (16)$$

$$\dot{m}_9 h_9 = \dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_7 h_7 \quad (17)$$

Tablo 3. Sistem bileşenlerinin enerji denkliği

Bileşenler	Net Enerji (kW)
Pompa	59.28
Rejeneratör	1306
Buharlaştırıcı	2695
Türbin	609.6
Yoğusturucu	2144.7

Tablo 4. Çevrim üzerindeki akışkanın anlık termodinamik özellikleri

Akım hattı	P (bar)	T (°C)	m (kg/s)	h (kJ/kg)	f (-)
1	6.43	33	2.8	-8873	0
2	121.43	35.22	2.8	-8813	0
3	121.43	131	2.8	-8348	0
4	121.43	230.86	2.8	-7386	0
5	121.43	230.86	1.49	-5119	0.54
6	121.43	230.86	1.31	-9975	0
7	6.43	97.9	1.49	-5527	0.82
8	121.43	39.4	1.31	-10972	0
9	6.43	73.79	2.8	-8069	0.45

Tablo 5. M/T tanker gemisinin simülör destekli veri değerleri

Okunan parametreler	Ana makine yükleri			
	100 %	75 %	50 %	25 %
Türbin Giriş Sıcaklık [K]	506.94	489.94	502.7	487.42
Türbin Çıkış Sıcaklık [K]	302.70	302.68	302.72	302.14
Türbin Giriş Entalpi [kJ/kg]	2916.12	2880.03	2908.3	2874.01
Türbin Çıkış Entalpi [kJ/kg]	2316.82	2300.47	2313	2297.1
Türbin Giriş Basıncı [bar]	7.81	7.79	7.81	7.85
Türbin Çıkış Basıncı [bar]	0.04	0.04	0.04	0.04
Buhar Kütle Debisi [kg/h]	3480.54	3457.03	3430.8	3043.23
Türbin Çıkış Kuruluk %	0.9	0.9	0.9	0.89
M/E Hızı [rpm]	74	67	49	29.60
M/E Egzoz Debisi [t/h]	174.60	132.60	68	37.45
Egzoz Giriş Sıcaklığı [K]	513.32	496	504	496.09

Tablo 6. Tasarlanan modelin ve gemide mevcut olan sistemle kıyası

Kalina-Rankine Karşılaştırması		
Proses parametresi	Rankine	Kalina
Kütle Debisi [kg/s]	0.75	2.8
Sistem Basıncı [bar]	7.81	6.43
Türbin Buhar Giriş Sıcaklığı [°C]	234.25	230.9

Yoğuşturucu

Türbinde yoğustucu basıncına kadar genişleyerek iş yapan akışkan yoğustucuda tamamen doymuş sıvı fazına dönüşmektedir. Yoğusturucudan olan ısı kaybını ihmal ederek enerji ve kütle dengesi aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\dot{m}_9 = \dot{m}_1 \quad (18)$$

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_9(h_9 - h_1) \quad (19)$$

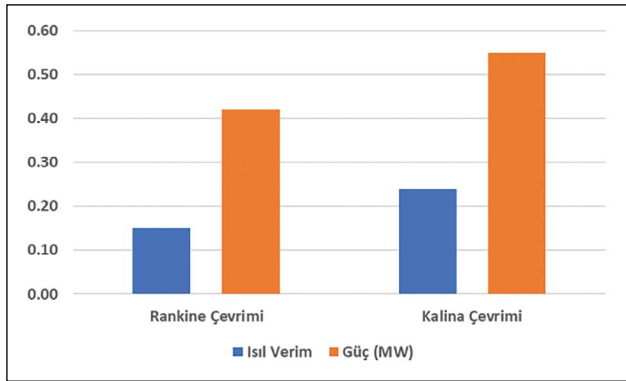
SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada bir M/T tanker gemisinin ısı-güç kombine çevriminde mevcut durumda 240 °C sıcaklıkta atmosfere atılmakta olan egzoz gazının atık ısı enerjisinden yararlanmak için bir Kalina çevrimi tasarlanmıştır. Çevrimde yer alan tüm komponentlerin enerji ve kütle korunumu ifadeleri türetilmiş ve AspenTech tarafından geliştirilen Aspen HYSYS programı kullanılarak optimum çözümler gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon çözümlemesinin bir sonucu olarak tasarlanan tesis için ideal amonyak-su karışım oranı %60 amonyak, %40 su olarak belirlenmiştir. Program ile hesaplanan sonuçlar Tablo 3 ve çevrim üzerindeki her bir noktadan ölçülen akışkanın anlık termodinamik özellikleri Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 3'e göre pompa elemanı 59.28 kW enerji tüketmekte buna karşın türbinden yaklaşık 609.6 kW olarak hesaplanmıştır. Sistemden alınan net güç 550.3 kW civarında olacaktır. Diğer taraftan sisteme ısı girişi buharlaştırıcı tarafından 2695 kW iken yoğusturucudan soğutucu deniz suyu ile

2144.7 kW'lık bir ısı çıkışı hesaplanmıştır. Model bir tanker gemisi üzerine tasarlandığı için ısı ve soğutma kaynakları karada bulunan işletmelere göre oldukça sınırlanmıştır. Bu nedenle modelde ısı kaynağı olarak baca kazanına giren ana makine egzoz gazı, soğutma kaynağı olarak ise deniz suyu kullanılmıştır. Sonuçlar makinenin tam yük altında ürettiği egzoz gazı parametreleri ve ortalama bir deniz suyu sıcaklığı baz alınarak elde edilmiştir. Model oluşturulurken tabloda gösterilen parametreler alt ve üst sınırlayıcı noktalar olarak kabul edilip bu çerçevede ihtiyaca göre değişiklikler yapmak mümkündür. Ekipmanların her birindeki enerji akışı analiz edildiğinde, çevrimde 174.50 kg/s debisindeki egzoz gazının ısı kapasitesi 26.98 kW/oC'dir. Buharlaştırıcıya giren ve çıkan sıcaklık farkları arttıkça ısı kapasite değeri de artacağından, enerji akışının en yüksek olduğu ekipman buharlaştırıcıdır.

Sistemde yer alan rejeneratörün amacı çevrim verimini yükseltmek ve karışım sıvısının buharlaşmasını hızlandırmak. Ancak rejeneratörde alınan ve verilen enerjilerin 1306 kW olarak hesaplanmıştır. Rejeneratörde giren ve çıkan karışımların ısı kapasitelerinin 13.63 kW/oC gibi düşük bir değerde olması, rejeneratördeki ısı enerji alışverişinin düşük olmasına neden olmaktadır. Diğer taraftan sistemden çevreye ısı çıkışı yoğusturucu elemanı üzerinden 2144.7 kW kadar gerçekleşmektedir. Sistem verimini arttırmak için atılan ısı miktarının düşük olması arzu edilen bir durumdur. Fakat soğutucu akışkan sıcaklıklarının sınırlı olması bu durumu kısıtlayan bir faktör olmaktadır. Bu durumda iş akışkanının ısı kapasitesinin düşük tutulması iyi



Şekil 3. Rankine ve Kalina çevrimlerinin ısı verimleri ve güç çıktıları.

bir sonuç verecektir. Ancak yoğunlaştırıcıda bu değer 52.57 kW/oC olduğundan dışarı atılan ısı enerjisinin yüksek olmasına neden olmaktadır.

Kalina çevrimli tesisten güç çıkışı türbin tarafında 609.6 kW'dır. Türbinden alınan güç ile türbin şaftına akupile edilmiş alternatör tarafında elektrik enerjisi üretilmektedir. Sisteme giren ve çıkan enerji miktarları türbin elemanı tarafından alınacak güç değerini direkt olarak etkilemektedir. Sistemde yer alan pompa güç tüketen bir elemandır ve iş akışkanının çevrim boyunca belirli basınçlar altında dolaşmasını sağlamaktadır. Pompa gücü, çevrimlerde yaralı iş miktarını belirleyen önemli bir parametredir. Bu güç bir akışkan kütlesi başına ne kadar düşük olursa yararlı iş miktarı da o kadar yüksek olacaktır. Sistemde pompanın gücü 59.28 kW'dır. Burada birim akışkan kütlesi başına alınan iş miktarı 21.17 kJ/kg'dır. İş akışkanının özgül hacmi pompa işini belirleyen diğer önemli faktördür. Özgül hacmi düşük olan (ya da yoğunluğu büyük olan) iş akışkanları için pompa güçleri daima düşük olmaktadır.

Mevcut haliyle tanker gemisinde atık ısı enerjisi geri dönüşümü için Rankine çevrimiyle çalışan bir turbo jeneratörü kullanılmaktadır. Simulatörden alınan verilere göre çalışma parametreleri değişken ana makine yükleri baz alınarak Tablo 5'te düzenlenmiştir. Örnek tanker gemisinde kullanılmakta olan, Rankine prensibine göre çalışan turbo jeneratör, (atık ısı geri dönüştürücüsü) Tablo 5'teki verilere göre ana makine tam yük altında çalışırken 0.75 kg/s kütle debisiyle 420 kW enerji geri dönüşümü yapmaktadır.

Çalışmada geliştirilen modelde ise Kalina prensibine göre tasarlanan bir sistemde, örnek tanker gemisindeki aynı ısı parametreleri altında 0.75 kg/s kütle debisiyle buharlaşmanın mevcut ısı kaynağından çok daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleştiği hesaplanmış ve bu nedenle türbin üzerinde iş elde edilememiştir. Yapılan optimizasyon çalışması sonucunda sistem akışkanı optimum kütle debisi olarak 2.8 kg/s hesaplanmış ve model bu değer baz alınarak tasarlanmıştır.

Çalışmada geliştirilen modeldeki türbinde Tablo 5'teki türbin parametrelerinde belirtildiği gibi 609.6 kW iş elde

edilmiştir. Pompa da ise Tablo 6'daki pompa parametrelerinde belirtildiği 59.28 kW iş harcanmıştır. Buradan elde edilen net 550.32 kW, elektrik enerjisi olarak sisteme geri kazandırılmıştır. Sisteme buharlaştırıcı üzerinden giren toplam ısı enerjisi 2695 kW'tır. Sistemde bu ısı enerjisinin 550 kW'ı ile iş elde edilmiştir. Tasarlanan sistemin ısı verimliliği %20.4 olarak hesaplanmıştır. Çalışmada karşılaştırılan iki sistemin enerji geri dönüşüm parametreleri Tablo 6'da karşılaştırmalı ısı verim ve güç çıktıları sırasıyla Şekil 3'te gösterilmiştir. Hesaplanan sonuçlara göre tasarlanan Kalina çevrimli sistemden yaklaşık 550 kW'lık güç elde edilirken, gemide mevcut Rankine prensibiyle çalışan turbo jeneratörlü sistemden 420 kW güç çıktısı elde edilmiştir. Aynı zamanda ısı verimleri açısından da Kalina çevriminin Rankine çevriminden daha verimli sonuçlandığı Şekil 3'te net bir şekilde gösterilmiştir. Özetle sistemin aynı parametreler çerçevesinde çalıştığı düşünüldüğünde Kalina çevrimi %31 daha fazla iş üretmiştir.

Kalina çevriminin en büyük avantajı sistemde kullanılan akışkanın Rankine'de kullanılabilecek kıyasla daha düşük sıcaklıklarda kaynama ve yoğunlaşma sıcaklıklarına sahip olmasıdır. Bu durum özellikle görece düşük sıcaklıklarda atık ısı enerjisi üreten sistemlerde Rankine'e kıyasla büyük avantaj sağlar. Örnek tanker gemisindeki turboşarj arası soğutucusu çıkış sıcaklığı 46°C'dir. Kalina'nın düşük sıcaklıklarda Rankine'e kıyasla daha yüksek buharlaşma oranı göz önünde bulundurulduğunda gemide en uygun kullanım alanlarında birisi de ana makine şarj hava soğutucusu soğutma çıkış suyudur.

Gemide yukarıda bahsedildiği gibi birçok farklı sistemde makineleri aşırı termal gerilmelere karşı korumak ve verimli bir işletme sağlamak amacıyla soğutma sistemleri kullanılmaktadır. Kalina çevrimiyle tasarlanacak olan bir atık ısı geri dönüşüm sistemi, yağlama yağı soğutma suyu geri dönüş, ana makine ceket suyu geri dönüş gibi atık ısı içeren birçok farklı üniteye özel olarak tasarlanabilir.

Kalina çevriminin en büyük avantajlarından birisi çalışma akışkanında bulunan amonyak oranı değiştirilerek, sabit basınç altında farklı buharlaşma ve yoğunlaşma sıcaklıklarına sahip olması özelliğidir. Çalışmada geliştirilen model, amonyak-su fraksiyonunda yapılacak değişimlerle birçok farklı gemi türünde ve farklı ısı parametreleri altında çalışabilir. Sonuç olarak model, gemilerde bulunan egzoz gazı ve şarj hava soğutucusu suyu gibi birçok farklı ısı kaynağına spesifik olarak tasarlanıp çalışmada gösterildiği gibi geleneksel buhar çevrimlerine göre daha verimli bir işletme sağlanabilir.

M/T Tanker gemisinde, Kalina sistemi ile atık ısıdan dönüştürülebilecek enerji miktarı Rankine çevrimli (buhar türbinli) sisteme nazaran %30 daha fazla olacaktır. Bununla birlikte yakıttan yaklaşık 610 ton/yıl tasarruf sağlanabileceği öngörüldüğünden bunun hem maliyet açısından hem de çevresel kirlilik açısından pozitif sonuçlarının olacağı açık olarak görülmektedir. Enerji verimliliğinde %4.8'lik bir iyileştirmenin olduğu da belirtilmiştir. Bu çalışmanın

devamı mahiyetinde sistemin termoekonomik analizleri işle maliyet/fayda, yatırımın geri dönüşümü, çevre kirliliğinin ne boyutlarda azaltılabileceği yönünde çalışma ile desteklenmesi öneri olarak sunulmaktadır.

DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada Kalina çevrimi, gemilerde baca yoluyla çevreye atılan ısı enerjisinden elektrik üretiminde yararlanmak için bir alt çevrim olarak düşünüldü. Kalina çevriminde güç üretebilmek için akışkan çiftine ihtiyaç vardır. Bu makalede akışkan çifti olarak amonyak-su karışımı kabul edilmiştir. Literatürde atık ısıdan enerji geri dönüştürmek için çoğunlukla organik rankine çevriminin (ORC) kullanıldığı anlaşılmaktadır. Ancak Kalina çevrimlerinin, Organik Rankine çevrimine göre çok daha performans gösterdiği ve maliyet bakımından da ilk yatırım maliyetlerinin daha az olduğu anlaşılmaktadır. Kalina çevriminde kullanılan amonyak yüksek basınçta buharlaştırılırken aynı zaman olası bir sızıntı durumunda zehirleyici bir özelliğinin olduğu bilinen bir gerçektir. Fakat dünya ticaretinin %90' nına yakın gemilerle yoluyla yapıldığından alınan güvenlik tedbirleri uluslararası düzeyde mevzuatlar tarafından sağlanmaktadır. Bunun yanında son yıllarda gemilerin baca yoluyla dışarı atılan egzoz gazlarının içerisinde bir bileşen olarak bulunan NOx gazlarının azaltılması için SCR olarak adlandırılan bir teknoloji kullanılmaktadır. Burada NOx emisyanları amonyak gazları ile reaksiyona tabi tutulmaktadır. Özetle amonyak gazı gerekli önlemler alındığında gemilerde kullanılabilmektedir. Bu durumda Kalina çevriminin de atık ısı ile enerji geri kazanımlarda gemilerde kullanılabileceği öngörülmektedir. Çalışmada Kalina çevriminin gemilerde de performans bakımından rahatlıkla kullanılabileceğine vurgu yapılmıştır.

REFERENCES

- Arash, N., Hossein, N., Faramarz, R., & Mortaza, Y. (2016). A comparative thermodynamic analysis of ORC and Kalina cycles for waste heat recovery: A case study for CGAM cogeneration system. *Case Studies in Thermal Engineering*, 9, 1–13.
- Bing, H., Simin, H., Youyuan, S., & Jiechao, C. (2019). Thermodynamic analysis of a new ammonia-water power cycle. *Energy Reports*, 6(Suppl 1), 567–573.
- Bliem, C. J. (1988). The Kalina cycle and similar cycles for geothermal power production. Inc. Idaho Falls, Idaho, Technical Report.
- Chen, Y., Guo, Z., Wu, J., Zhang, Z., & Hua, J. (2015). Energy and exergy analysis of integrated system of ammonia– water Kalina–Rankine cycle. *Energy*, 90, 2028–2037.
- Thorin, E., Dejfors, C., & Svedberg, G. (1998). Thermodynamic properties of ammonia-water mixtures for power cycles. *International Journal of Thermophysics*, 19(2).
- Francesco, B., & Cecilia., G. (2014) A feasibility analysis of waste heat recovery systems for marine applications. *Energy*, 80, 654–665.
- Ganesh, N. S., & Srinivas, T. (2011). Evaluation of thermodynamic properties of ammonia-water mixture up to 100 bar for power application systems. *Journal of Mechanical Engineering Research*, Vol. 3, No. 1, pp. 25–39.
- Henry A. MLCAR, An Introduction to the Kalina Cycle. PE, 1996
- Dhahada H.A., Hussien H.M., Nguyen P.T., Ghaebi H., Ashraf M. A. Thermodynamic and thermoeconomic analysis of innovative integration of Kalina and absorption refrigeration cycles for simultaneously cooling and power generation. *Energy Conversion and Management*, 203, Article 112241.
- Mergner, H., Weimer, T. (2015). Performance of ammonia–water based cycles for power generation from low enthalpy heat sources. *Energy*, 88, 93–100.
- Kaita, Y. (2001). Thermodynamic properties of lithium bromide–water solutions at high temperatures. *International Journal of Refrigeration*, 24(5), 374–390.
- Kalina, A., Leibowitz., Lazzeri, H. L., & Diotti F. Recent development in the application of the kalina cycle for geothermal plants. *Ansaldo Energia*, 2093–2096.
- Larsen, U., Pierobon, L., Haglind, F., & Gabrielli, C. (2013). Design and optimisation of organic Rankine cycles for waste heat recovery in marine applications using the principles of natural selection. *Energy*, 55, 803–812.
- MAN Diesel & Turbo, Waste heat recovery system (WHRS), Denmark., 2012 www.mandieselturbo.com
- Şentürk Acar, M. (2020). Thermodynamic and economic analysis of geothermal energy powered kalina cycle. *Journal of Thermal Science and Technology*, 40(2), 335–347.
- Narayanan, S. Ganesh and Tangellapalli Srinivas, “Nuclear energy-driven Kalina cycle system suitable for Indian climatic conditions. CO2 Research and Green Technologies Centre, School of Mechanical and Building Sciences, Vellore Institute of Technology (VIT), 298–308.
- Bombarda, P., Invernizzi, C.M., & Pietra, C. (2018). Heat recovery from Diesel engines: A thermodynamic comparison between Kalina and ORC cycles. Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Brescia, Via Branze 38, 25123 Brescia, Italy, 2009
- Patel, H. A., Patel, L. N., Jani, D., & Christian, A. (2016). Energetic analysis of single stage lithium bromide water absorption refrigeration system. *Procedia Technology*, 23, 488–495.

- Nag P.K., & Gupta A.V.S.S.K.S. (1997). Exergy analysis of kalina cycle. Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology, Kharagpur, 721302 India.
- Ogriseck, S. (2009). Integration of Kalina Cycle in a Combined Heat and Power Plant, A Case Study. *Applied Thermal Engineering*, 29(14-15), 2843–2848.
- Ulrik, L., Tuong-Van, N., Thomas K., & Fredrik, H. (2013). System analysis and optimisation of a Kalina split-cycle for waste heat recovery on large marine diesel engines. *Energy*, 64, 484–494.
- Wang, J., Yan, Z., Wang, M., & Dai, Y. (2013). Thermodynamic analysis and optimization of an ammonia-water power system with LNG (liquefied natural gas) as its heat sink. *Energy*, 50, 513–522.
- Zhu, Q., Lin, D., & Li, X. (2015). Thermodynamic comparative analyses between (organic) rankine cycle and kalina cycle. *Energy Procedia*, 75, 1618–1623.
- Yang K., Zhang, H., Wang, Z., Zhang, J., Yang, F., & Wang, E. (2013). Study of zeotropic mixtures of ORC (organic Rankine cycle) under engine various operating conditions. *Energy*, 58, 494–510.
- Koç, Y., & Yağlı H., (2020). Isı-güç kombine sistemlerinde kullanılan kalina çevriminin enerji ve ekserji analizi. *Journal of Polytechnic* 23(1), 181–188.
- Wang, Y., Tang Q, Wang, M., & Feng X. (2017). Thermodynamic performance comparison between ORC and Kalina cycles for multi-stream waste heat recovery. *Energy Conversion and Management*, 143, 482–492.
- Mat Nawi, Z., Kamarudin, S.K., Sheikh Abdullah, S.R., & Lam, S.S. (2019). The potential of exhaust waste heat recovery (WHR) from marine diesel engines via organic rankine cycle. *Energy*, 166, 17–31.
- Zhoua, C., Zhuangab, Y., Zhanga, L., Liua, L., Dua, J., & Shenb, S. (2020). A novel pinch-based method for process integration and optimization of Kalina cycle. *Energy Conversion and Management*, 209, Article 112630.
- Zheng, S., Chen, K., Yang, Fan, G., Dai, Y., Zhao, P., & Wang, J. (2021). Comparative analysis on off-design performance of a novel parallel dual-pressure Kalina cycle for low-grade heat utilization. *Energy Conversion and Management*, 234, 1–21.