

Gemilerde Kullanılan Termik Yağ Sisteminin Performans Analizleri

Asım Sinan Karakurt¹, Burak Başaran^{1,2}, Engin Ziya Çubukçu³

¹ Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

² Seft Gemi İnşaa Sanayi ve Mühendislik, İstanbul, Türkiye

³ Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

¹ (sorumlu yazar), asinan@yildiz.edu.tr, ORCID: 0000-0002-6205-9089

² burak.basaran@std.yildiz.edu.tr, 0000-0001-8332-1421

³ ziya.cubukcu@std.yildiz.edu.tr, 0000-0003-3897-1489

ÖZET

Enerji verimliliği günümüzde giderek önem kazanmaktadır. Enerji verimliliğinin artırılması ile yakıt tüketimi ve çevreye zararlı olan etkileri azaltmak mümkün olmaktadır. Ayrıca yakıt fiyatlarının önümüzdeki yıllarda artan trend göstermesi öngörülmektedir. Gemilerde uygulanan enerji verimliliği uygulamalarında enerji kaybının yaklaşık %25'ini oluşturan ekzoz gazından enerji kazanım yöntemleri öne çıkmaktadır. Gemilerde atık egzoz baca gazı enerjisini geri kazanmak için ekonomizer kullanılmaktadır. Bu çalışmanın amacı, ekonomizer ana kazanın ön ısıtıcısı olarak çalışırken, termik yağ sisteminin performans, maliyet ve çevresel etki analizlerini gerçekleştirmektir. Bu kapsamda ana makinesi 4350 kW, kazanı 1500 kW ve ekonomizeri 340 kW olan bir gemi ele alınmıştır. Sonuç olarak, incelenen sistemde, termik yağ olarak Syltherm XLT ve yakıt olarak da VLSFO'nun kullanılması ile hem yakıt maliyeti açısından tasarrufun sağlandığı hem de SO_x salımlarının azaldığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Enerji geri kazanımı, termal yağ, termik sistem

Makale geçmişi: Geliş 27/11/2022 – Kabul 28/12/2022

<https://doi.org/10.54926/gdt.1210117>

Performance Analyses of Marine Thermal Oil System

Asım Sinan Karakurt¹, Burak Başaran^{1,2}, Engin Ziya Çubukçu³

¹ Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Naval Architecture and Maritime Faculty, Yıldız Technical University, İstanbul, Türkiye

² Shipbuilding Endustri and Engineering, İstanbul, Türkiye

³ Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Naval Architecture and Maritime Faculty, Yıldız Technical University, İstanbul, Türkiye

¹(corresponding author), asinan@yildiz.edu.tr, ORCID: 0000-0002-6205-9089

² burak.basaran@std.yildiz.edu.tr, 0000-0001-8332-1421

³ ziya.cubukcu@std.yildiz.edu.tr, 0000-0003-3897-1489

ABSTRACT

Energy efficiency is getting more and more important nowadays. By increasing energy efficiency, it is possible to reduce fuel consumption and harmful effects on the environment. In addition, fuel prices are expected to show an increasing trend in the coming years. In energy efficiency applications applied on ships, energy recovery methods from the exhaust gas, which constitutes approximately 25% of energy loss, come to the fore. Economizers are used to recovering the waste exhaust flue gas energy in ships. The aim of this study is to perform performance, cost, and environmental impact analyses of the hot oil system while the economizer is working as the preheater of the main boiler. In this context, a ship with the main engine (4350 kW), boiler (1500 kW) and economizer (340 kW) is considered. As a result, it has been observed that the use of Syltherm XLT as thermal oil and VLSFO as fuel in the examined system provides both savings in terms of fuel costs and reduced SOX emissions.

Keywords: Energy recovery, thermal oil, thermal system

Article history: Received 27/11/2022 – Accepted 28/12/2022

1. Giriş

Dünyada üretimin artmasına bağlı olarak fosil yakıtlar kullanan içten yanmalı motorların kullanılması, küresel ısınmayı olumsuz etkilediği için, ekolojik olarak büyük bir tehlike oluşturmaktadır. CO₂, SO_x ve NO_x emisyonları bu tehlikenin en önemli unsurları olarak görülmektedir (El-Taybany vd., 2019). Dünya ticaretinin %90'ından fazlasının deniz taşımacılığı ile yapıldığı ve CO₂ salımının yaklaşık olarak %3'ünün deniz taşımacılığı endüstrisinden kaynaklandığı bilinmektedir (Saraçoğlu vd., 2013). Dünya gemi taşımacılık filosunun yarısından fazlası limanlarda çeyreği de sahile yakın olmak üzere çok büyük bir kısmının kıyı bölgelerinde ve yakını yerlerde bulunmaktadır (Kiliç, 2009). Gemi kaynaklı emisyonlar özellikle liman bölgelerini ve kıyı kesimlerini hem insan sağlığı hem de ekolojik denge yönlerinden etkilemekte ve hatta kıtalar arasında olumsuz bir etkileşime sebep olabilmektedir (Aygül & Baştuğ, 2020). Gemiler için de enerji verimliliği ve emisyon salımı kavramları gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Şu anki veriler ile 2050 yılı için, atmosferde yer alan karbon dioksit yoğunluğu 500 ppm civarı ve hatta üzerinde değerlere ulaşacağı ve bu miktarların da küresel ısınmayı arttıracığı öngörülmektedir (Bogdanowicz & Kniaziewicz, 2020). Buradan hareketle, Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) tarafından 2050 yılı hedefleri kapsamında, iklim değişikliği ile mücadele amacı ile hem denizcilik kaynaklı sera gazı emisyonlarının 2018 yılına oranla yarıya düşürülmesi hem de karbon yoğunluğunun 2008 yılına göre %70 azaltılması hedeflenmektedir (IMO, 2018).

Dünyada enerji fiyatlarının önümüzdeki yıllarda daha da artması öngörülmektedir ve yakıt fiyatlarındaki bu artış deniz yolu taşımacılığında da etkisini göstermektedir (Kiliç, 2009). Artan yakıt fiyatları da taşınan ürünlerin nakliye ücretlerinin artmasına neden olmaktadır. Gemilerdeki işletme maliyetleri hesaplandığında kullanılan yakıt sarfiyatının bu konudaki en önemli masraf kalemi olduğu görülmektedir. Gemilerde kullanılan makinelerin termik verimleri, teknolojisine göre, %50'lere ulaşabilmekte ve sisteme giren enerjinin geriye kalan büyük çoğunluğu da kullanılabilir ve kullanılmayan enerji olarak sistem kayıpları, soğutma suyu ve egzoz gazı şeklinde atılmaktadır (Dzida, 2009). Atılan bu enerjinin kullanılabilir kısmının geri kazanılması enerji verimliliğini arttırarak hem maliyetlerin hem de emisyonların azaltılmasına olumlu katkı sağlayacaktır. Makinenin verimi arttırılması yanında gemide kullanılan diğer sistemlerde atık ısı geri kazanım yöntemleri kullanımı ile yakıt tasarrufu sağlanması da mümkündür. Kargo bölümü için ısıtıcı sistemlerin kullanıldığı kimyasal tankerlerde işletme maliyetleri kuru yük gemilerinden daha fazladır. Örnek olarak; 5000 DWT kimyasal tankerin günlük işletme maliyeti aynı tonajdaki kuru yük gemisinin günlük işletme maliyetinden 371 \$ daha fazladır (Çolak, 2015).

Literatürde, termik sistemlerde atık ısıdan enerji kazanımı üzerine yapılan çalışmalarda çoğunlukla enerji tüketimi, ekonomik etkiler, çevresel etkiler ve verimler gibi kriterler incelenmiştir. Bunların yanında termik sistemlerin iyileştirilmeleri için yapılan çalışmalarda kullanılmak üzere, destekleyici nitelikte sonuçlar da elde edilmiştir. Ma vd. (2012) tarafından bir dizel motorunda atık ısıyı geri kazanmak ve enerji verimliliğini arttırmak için kombine bir türbin-egzoz gazı atık ısı geri kazanım sistemi önerilmiştir. Enerji ve ekserji analizleri çerçevesinde farklı basınç ve sıcaklık değerlerinin etkileri incelenmiş ve önerilen sistem için en uygun basınç değeri ile bu değerdeki verim değerleri paylaşılmıştır. Güneş (2013) tarafından yapılan çalışmada gemilerde kullanılan farklı atık ısı geri kazanım yöntemleri ve organik rankine çevrimi sistemlerinin termoeconomik incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Analizlerde farklı güçlerdeki iki zamanlı motorlarda motor yüklerinde ve dizayn koşullarındaki değişimlerin atık enerji potansiyelleri üzerindeki etkileri incelenerek ne tür bir enerji kazanımı tekniğinin uygulanmasının ekonomik olarak daha uygun olduğunu gösteren analizler yapılmıştır. Güneş ve Karakurt (2015) tarafından iki zamanlı bir dizel motorunda kullanılan çift basınç kademeli bir atık ısı kazanına ait enerji ve ekserji analizleri (değişken motor yükleri, değişken egzoz gazı

sıcaklıkları ve farklı yakıtlar için) gerçekleştirilmiş ve bunların termik verim, yakıt tüketimi ve ekserji verimi üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Akman (2017) tarafından yapılan çalışmada ise bir kimyasal tankere ait ana makinenin atık ısı analizleri gerçekleştirilmiş ve farklı kalitelere ait atık ısı kaynaklarının kullanıldığı bir organik rankine çevrimi modeli incelenmiştir. Organik rankine çevrimi kullanılarak atık ısıların kullanılabilir enerjiye dönüştürülmesi ile toplam termik verim %8 civarında artmış ve buna karşılık da yılda 14,6 g/kWh'a yakın yakıt tasarrufu sağlanmıştır. Köroğlu ve Söğüt (2017) tarafından beş silindirli, iki zamanlı, düşük devirli bir gemi dizel motoru egzoz kazanından sonra yerleştirilen bir organik Rankine çevriminin enerji, ekserji ve ileri ekserji analizleri yapılarak farklı çalışma koşulları altında parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Kökkülünk vd. tarafından (2017) bir dökme yük gemisinde kullanılan 600 kW kapasiteli bir dizel jeneratörün atık ısı potansiyeli farklı yükler, değişken liman süreleri ve farklı çalışma senaryoları baz alınarak analiz edilmiştir. Akman ve Ergin (2019, 2021) tarafından gemilerde, hem organik Rankine çevrimi hem de transkritik organik Rankine çevrimi temelli atık ısı geri kazanım yöntemlerinin, farklı çalışma koşullarında, performans ve emisyon üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Nugroho vd. (2020) tarafından yakıt tanklarının baca kazanı ve yakıt ile çalışan ilave bir kazan yardımıyla ısıtıldığı iki farklı simülasyon için ısı transferi analizi yapılmıştır. Termik yağ olarak Therminol 66 kullanıldığı çalışmada farklı ana makine devirlerindeki ısıtma kapasiteleri belirlenmiştir. Yakıt kazanı ile yapılan ısıtma kapasitesinde baca kazanına göre daha hızlı ısıtma süresine sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Başhan ve Kökkülünk (2020) tarafından değişken deniz suyu sıcaklıklarının atık ısı geri kazanım sistemine sahip bir soğutma sisteminin ekserji verimi, yakıt tüketimi ve emisyonlar üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak, soğutma sisteminde atık ısı geri kazanımının kullanılmasının yakıt tüketimini ve emisyonlarını doğrudan azalttığı görülmüştür. Delibaş ve Kayabaşı (2021) tarafından gemilerde kullanılan farklı türdeki atık ısı geri kazanım yöntemleri için enerji, çevre ve maliyet analizleri gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmanın amacı, gemilerde kullanılan termik yağ sisteminin çalışma prensibini aktarmak ve ilgili sisteme ait olan komponentler hakkında bilgi vermek olup aynı zamanda ekonomizer, yakıtlı kazanın ön ısıtıcısı olarak çalışırken, termik yağ sisteminin 7 farklı termik yağ ve 4 farklı yakıt türü için karşılaştırmalı performans, maliyet ve çevresel etki analizlerini gerçekleştirmektir. Bu amaçların yanında, elde edilen sonuçlar doğrultusunda optimum termik yağ ve yakıt seçiminde kullanılmak üzere bir referans oluşturmak ve baca kazanının sisteme etkisini gözlemlektir.

2. Termik Yağ Sistemlerinin Çalışma Prensibi ve Termodinamik Modeli

Günümüz endüstrisinde doğrudan ısı transferinin mümkün olmadığı sistemler bulunmaktadır. Aynı zamanda termik yağ ile ısıtma yapılması gereken birçok işlem bulunmaktadır. Isıtılacak malzeme yanıcı olduğunda, ısıtılacak madde termolize neden olabileceğinden ve gerektiğinde yüksek sıcaklıkta eşit ısıtma elde edilme gereksiniminden dolayı termik yağ sistemine gereksinim duyulmaktadır. Bu gibi sistemlerde sistemin çalışma basıncı düşük tutulmak istenildiğinde, termik yağ sistemi tercih edilmektedir. Termik yağ sistemleri korozyon, donma ve kireçlenme riski olmaması, daha düşük sistem basınçlarıyla çalışabilmesi ile güvenlik risklerini asgariye indirmesi, daha fazla enerji verimliliği ile ekonomik tasarruf sağlaması gibi birçok yönden avantajlar sağlamaktadır.

Gemilerde kullanılan sıcaklık isterleri çok yüksek değerlere ulaşabilmektedir. Bu sıcaklıklara buhar sıcaklığı ile çıkılmak istenirse 240 °C için buhar basıncının yaklaşık 25 bar değerine çıkması gerekmektedir. Buhar kullanarak böyle bir sistem kurmak hem işletmeyi çok zorlaştıracağı gibi hem de çok maliyetli olacaktır. Bu nedenle gemilerde istenilen ısıtma ve soğutma işlemlerinin, özel sıcaklık düzeylerinde yapılabilmesi için termik yağ sistemlerine gereksinim duyulmaktadır (Şekil 1).

Termik yağ sistemlerinde yaygın bir şekilde kullanılan ve bu çalışmada da tercih edilen 7 farklı akışkana ait yoğunluk, alevlenme noktası, ısıl genişleme katsayısı, ısıl iletkenlik ve çalışma sıcaklık aralığı gibi termofiziksel özellikler Tablo 1’de verilmiştir (“Shell Thermia Oil D”, 2022; SYLTHERM™ XLT, 2022; Therminol Heat Transfer Fluids, 2022; “XCEL THERM® 600”, 2022).

Tablo 1. Termik yağların termofiziksel özellikleri

Termal Akışkan	Therminol 72	Therminol 66	Therminol 55	Therminol 59	Shell Thermia D	Syltherm XLT	Xceltherm 600
Yoğunluk (@20 °C) (kg/m ³)	1079	1008	872	857	885	852	851
Parlama Noktası (ASTM D-92) (°C)	132	184	177	208	252	54	216
Isıl Genleşme Katsayısı (1/°C)	0,00113	0,000819	0,000961	0,000971	0,0008	0,0008	0,00089
Isıl İletkenlik (@200 °C) (W/m*K)	0,118	0,1056	0,1074	0,121	0,134	0,062	0,094
Sıcaklık Aralığı (°C)	-14 - 380	-3 - 345	-28 - 290	-49 - 315	-9 - 320	-100 - 280	-21 - 315
Kritik P (bar)	32,4	24,3	13,2	22,3	-	12,16	15,2
Kritik T (°C)	527	569	512	514	-	327	542
Akma Noktası (°C)	-18	-32	-54	-68	-9	-110	-29
Kendiliğinden Tutuşma Sıcaklığı (°C)	603	374	366	372	-	350	349

Çalışmada kullanılan Syltherm XLT ısı transfer yağının çalışma sıcaklığı -100 ile 280 °C aralığındadır. Pompa tarafından baca kazanına aktarılan ısı transfer yağı 200 °C’ye kadar ısıtılmaktadır. Baca kazanı ile atıl olan ana makine egzoz gazının ısıl enerjisi ile termik akışkanın ısıtılması sağlanır. Ön ısıtması tamamlanan Syltherm XLT, yakıt ile çalışan kazana girerek 280 °C’ye ısıtılmaktadır. Sıvı yakıt yakılarak kimyasal enerjisinin termik akışkana geçişi sağlanır. Gerekli sıcaklığa ulaşmış termik akışkan, buhar kazanına, tank yıkama suyu ısıtıcısına ve ikincil bir termik sistem olan kargo bölümü ısıtıcısına tercih edilen miktarlarda gönderilir. Buhar kazanında termik yağın ısı enerjisi kazan içerisinde suya aktarılır ve kızgın buhar elde edilir. Tank yıkama suyu ısıtıcısında termik yağın ısı enerjisi kargo yıkama suyunun istenen sıcaklığa ulaşması için kullanılır. İkincil bir termik sistemde ise termik yağın ısı enerjisi, diğer bir termik yağ ısıtılması için kullanılır.

Sistemde yer alan termik elemanların çalışma prensipleri de şu şekildedir. Baca kazanı bu sistemde ön ısıtıcı görevi görmektedir. Baca kazanında ön ısıtması yapılan termik yağ daha sonra sirkülasyon pompaları vasıtasıyla tekrar kazanlara gönderilerek sistemi başlangıç durumuna getirip bir çevrim oluşturur. Degazör tankının sistemdeki görevlerinden biri her ne kadar sistem kapalı çevrim olsa da sistemde yaşanabilecek istenmeyen kaçaıklardan doğan yağ kaybını sisteme tekrar kazandırmak ya da sistemdeki yağın sıcaklığının değişmesiyle oluşan buharın genişleme tankına gönderilmesini sağlamaktır. Sirkülasyon pompaları, degazör tankından gelen yağı tekrar kazana göndermek için kullanılan pompalardır ve girişlerinde filtre ve kesici vana, çıkışlarında ise geri döndürmez kesici vana kullanılmaktadır. Genleşme tankı, sistemdeki yağın ısınması ile hacminin arttığı durumda, borularda basınç artışına veya patlamaya sebebiyet vermemesi için kullanılır. Termik yağ sisteminde yakıtlı kazan, sistemdeki yağın ana ısıtıcısı görevini görmektedir. Kazanın içerisinde bulunan ısıtma kangalları, brülör vasıtasıyla ısıtılır ve kangalların içerisindeki yağın sıcaklığı bu şekilde artırılır. Isıtma kangallarının yüzey alanları, kalınlığı ve malzemesi kazan dizaynında sıcaklık değişim isterlerini karşılayacak şekilde

Tablo 2. Sistemdeki komponentlerin denge denklemleri

Komponent	Denge Denklemleri	
Baca Kazanı (bk)	$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$	$\dot{Q}_{bk} * \eta_{yanma} = \dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_1 h_1$ $\dot{Q}_{bk} * \eta_{yanma} = \dot{Q}_{termik_yağ}$
Yakıt Kazanı (yk)	$\dot{m}_2 = \dot{m}_3$	$\dot{Q}_{yk} = \dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_2 h_2$ $\dot{m}_{yakıt} * LHV_{yakıt} * \eta_{yanma} = \dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_2 h_2$
Tank Yıkama Isı Değiştiricisi	$\dot{m}_4 + \dot{m}_{12} = \dot{m}_7 + \dot{m}_{13}$	$\dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_{12} h_{12} = \dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_{13} h_{13}$
Tank Isıtma Isı Değiştiricisi	$\dot{m}_5 + \dot{m}_{14} = \dot{m}_8 + \dot{m}_{15}$	$\dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_{14} h_{14} = \dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_{15} h_{15}$
Buhar Kazanı	$\dot{m}_6 + \dot{m}_{16} = \dot{m}_9 + \dot{m}_{17}$	$\dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_{16} h_{16} = \dot{m}_9 h_9 + \dot{m}_{17} h_{17}$
Tatlı Su Isı Değiştiricisi	$\dot{m}_{10} + \dot{m}_{18} = \dot{m}_{11} + \dot{m}_{19}$	$\dot{m}_{10} h_{10} + \dot{m}_{18} h_{18} = \dot{m}_{11} h_{11} + \dot{m}_{19} h_{19}$

3. Analizler ve Değerlendirme

Geminin ana makine ve baca kazanı teknik özellikleri Tablo 3 ve Tablo 4'te verilmiş olup dakikada 167 devir yaparak 4350 kW güç üreten bir makinenin (MAN 5S35ME-C9.7 HL) (CEAS Engine Calculations, 2022) baca kazanının (HEATMASTER HTX3-40-1140-SF) 10 bar basınçta 250 kW ısı enerjisi sağladığı kabul edilmiştir (Heat System Design, 2022).

Tablo 3. Ana makine egzoz parametreleri (ISO) (CEAS Engine Calculations, 2022)

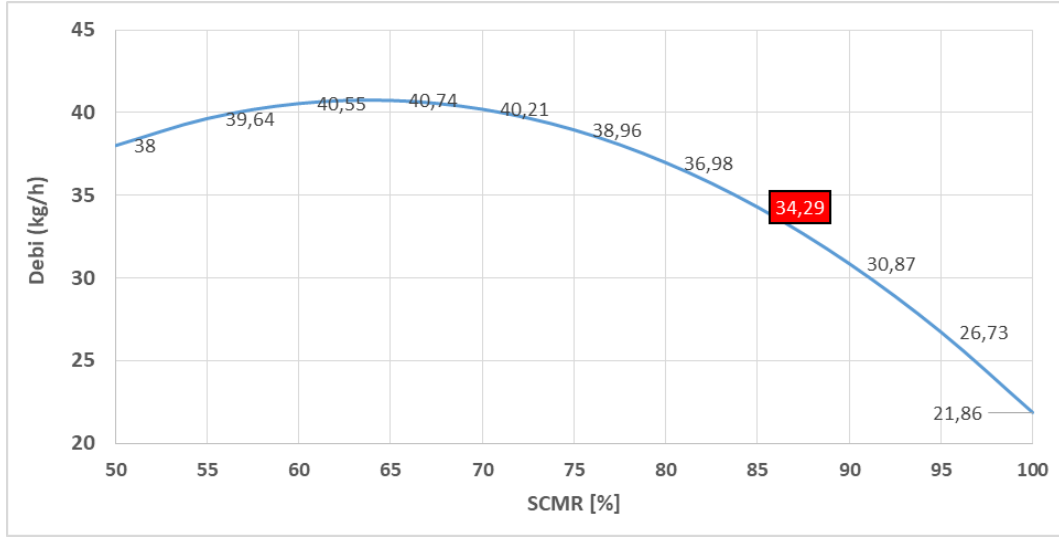
(*Egzoz gazının parametre değerleri turboşarj sonrası için gösterilmiştir.)

Devir (%)	100	95	90	85	80	75	70	65	60	55	50
Güç [kW]	4350	4133	3915	3698	3480	3263	3045	2828	2610	2393	2175
Devir [d/dk]	167	164,2	161,2	158,2	155	151,7	148,3	144,7	140,9	136,8	132,5
Debi [kg/s]	9,1	8,8	8,5	8,2	7,8	7,5	7,1	6,7	6,3	5,8	5,4
Çıkış* [°C]	240	233	228	224	221	220	220	222	225	229	235

Tablo 4. Ana makine yük durumuna bağlı olarak baca kazanı girişi ve çıkışı ısı enerjileri (Ana makine egzoz gazının bacadan çıkışı sıcaklığı 200 °C kabul edilmiştir.)

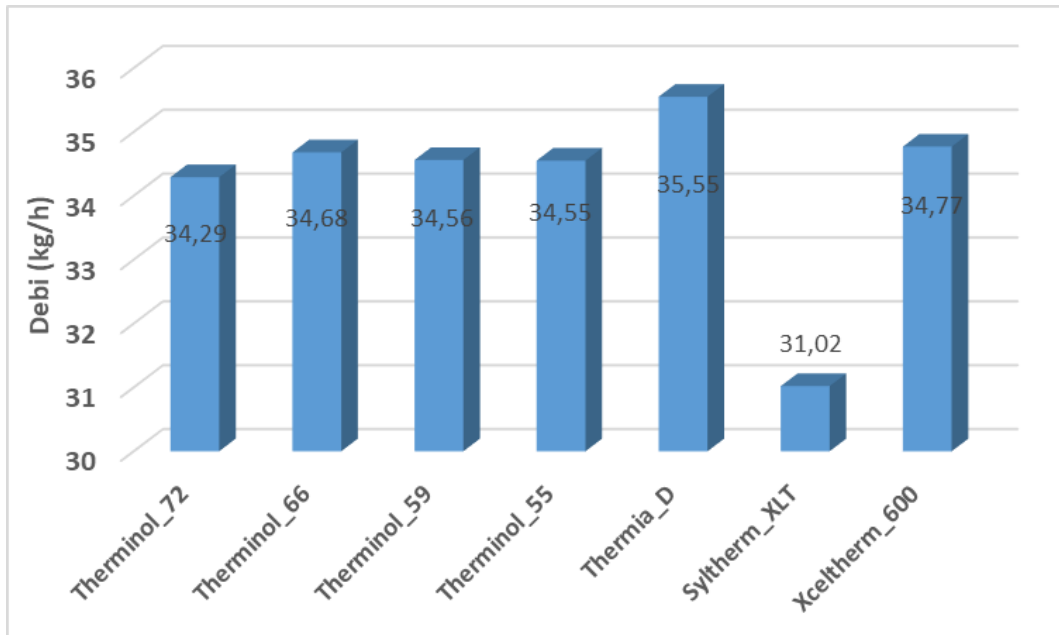
SMCR [%]	Debi [kg/s]	Giriş Sıcaklığı [K]	Giren Akışkan Isıl Yük [kJ/kg]	Çıkan Akışkan Isıl Yük [kJ/kg]
100	9,1	513,15	4709,123	4337,843
95	8,8	506,15	4491,045	4194,837
90	8,5	501,15	4294,591	4051,831
85	8,2	497,15	4109,561	3908,825
80	7,8	494,15	3885,227	3718,151
75	7,5	493,15	3728,145	3575,145
70	7,1	493,15	3529,311	3384,471
65	6,7	495,15	3344,144	3193,796
60	6,3	498,15	3163,772	3003,122
55	5,8	502,15	2936,343	2764,779
50	5,4	508,15	2766,884	2574,104

Geminin ana makinesinin atık ısı değerlerinin bulunabilmesi için MAN CEAS yazılımından yararlanılmıştır. Yazılım, farklı özelliklerdeki ana makineler için çeşitli seçeneklerde performans analizleri yapmaktadır. Ele alınan ana makinenin tasarım parametreleri (silindir sayısı, turboşarjır tipi, pervane tipi vb.) ve çalışma koşulları yazılıma tanımlanarak, farklı çevre koşullarında (ISO, tropik vb.) enerji analizleri gerçekleştirilmektedir (CEAS Engine Calculations, 2022).



Şekil 2. Seyir durumunda ana makine yük durumuna göre yakıt debi miktarları

Şekil 2’de görülebileceği gibi ana makine devri %65 olduğunda yakıtlı kazan yakıt sarfiyatı maksimuma ulaşırken, %65 ana makine devrinden sonra düşüşe geçerek %100 devirde minimum değerine ulaşmıştır. Ancak ana makine devri ideal olarak %85 olarak kullanıldığı için bu grafikten %85 ana makine devrinde yakıt debisi olarak 34,29 kg/h sarfiyat değeri olarak kabul edilmiştir.



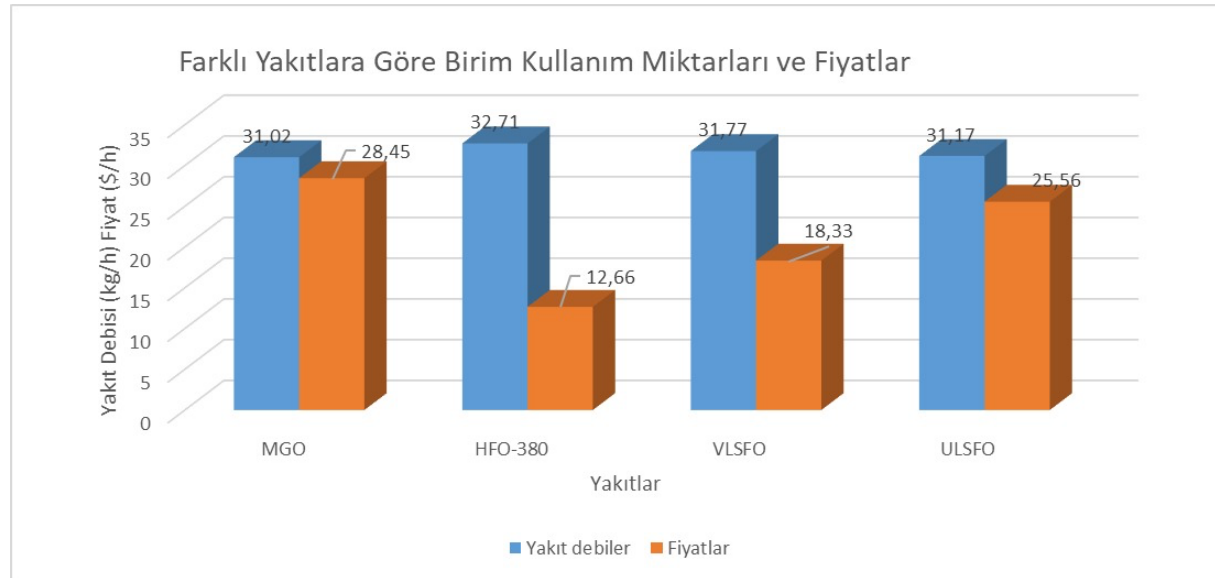
Şekil 3. Seyir durumunda (%85 SCMR) farklı termik yağlara göre yakıt debisi miktarları

Tablo 1’de termodinamik özellikleri verilen termik yağlar ile Engineering Equation Solver (EES) programında yapılan analizlerde seyir durumunda ana makine ideal yükü olan %85 ile çalışırken yakıtlı kazanındaki yakıt sarfiyatları Şekil 3’teki gibi elde edilmiştir. Şekilden görülebileceği üzere Syltherm XLT termik yağı 31,02 kg/h sarfiyat ile en düşük yakıt tüketimini sağlamıştır. Buna karşın 35,55 kg/h yakıt sarfiyatı ile Thermia D termik yağı en yüksek yakıt sarfiyatına sebebiyet vermiştir. Syltherm XLT yağının istenilen şartları en az yakıt tüketimi ile sağlamasından dolayı bundan sonraki analizlerde diğer yağ türleri kullanılmayacaktır. Syltherm XLT kullanılan sistemde yer alan baca kazanı, buhar kazanı ve yakıtlı kazan ile tank yıkama suyu, kargo tank ısıtma, tatlı su ve bünye tankları ısıtma devrelerindeki ısı denge değerleri Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 5. Termik yağ olarak Syltherm XLT kullanan sistemin parametreleri

(*Baca kazanı çıkış sıcaklığı, ana makine egzoz gazının baca kazanındaki enerji denklemleri vasıtasıyla hesaplanmıştır.)

i	Komponent	Akışkan Cinsi	Debi [kg/s]	T_giren [K]	h_giren [kJ/kg]	T_çıkan [K]	h_çıkan [kJ/kg]	Isı Miktarı [kJ/s]
A	Baca Kazanı	Syltherm XLT	5	443	487,4	469,1*	542,7	214,9
B	Yakıtlı Kazan	Syltherm XLT	5	469,1*	542,7	553	729,9	325
C	Tank Yıkama I. D.	Syltherm XLT	1,2	288	60,03	358	341,1	140
D	Tank Isıtma I. D.	Syltherm XLT	1	433	466,9	473	551,2	183,3
E	Buhar Kazanı	Syltherm XLT	2,8	289,2	104,9	370	406,3	112,7
F	Tatlı Su I. D.	Syltherm XLT	5	309	150,3	329	233,9	47,31
G	Bünye Tankları I.	Syltherm XLT	5	309	150,3	329	233,9	56,55

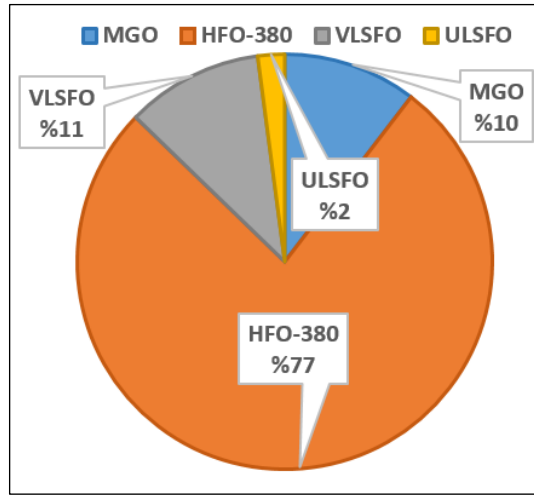


Şekil 4. Seyir durumunda (%85 SCMR) farklı yakıtlara göre debi ve birim maliyetleri

Şekil 3’teki karşılaştırmada en verimli termik yağın Syltherm XLT olduğu gözlemlenmiş olup bu yağ için yakıtlı kazanın farklı özelliklerdeki akaryakıt seçenekleri için, Tablo 6, birim sarfiyatları ile bu sarfiyatlardan kaynaklı yakıt maliyetleri Şekil 4’te gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere en yüksek yakıt sarfiyatı HFO-380 akaryakıt tipinde gözlenmesine rağmen aynı zamanda en düşük maliyet de yine HFO-380’de 12,66 \$/h olarak gözlemlenmiştir. Bunun sebebi ise HFO-380 fiyatının diğer akaryakıtlardan daha uygun olmasıdır (*Rotterdam Bunker Prices, 2022*).

Tablo 6. Analizlerde kullanılan yakıtların özellikleri (*Marine Fuel and Lubricants : IndianOil, 2022*)

Özellikler	Test Metodu	Birim	VLSFO	ULSFO	HFO-380	MGO
Kinematik Viskozite (50°C)	ISO 3104	cSt	Maks 380	10-60	Maks 380	1,4-11
Yoğunluk (15°C)	ISO 3675 / 12185	kg/m ³	Maks 991	790-910	Maks 991	Maks 876
Sülfür	ISO 8754 / 14596	% kütle	Maks %0,5	Maks %0,1	Maks %3,5	Maks %0,1
Parlama Noktası	ISO 2719	°C	Min 66	Min 60	Min 60	Min 66
Hidrojen Sülfür	IP 570	mg/kg	Maks 2,0	Maks 2,0	Maks 2,0	Maks 2,0
Asit İndeksi	ASTM D664	mg KOH/g	Maks 2,5	Maks 0,5	Maks 2,5	Maks 0,3
Artık Yakıtlardaki Toplam Tortu	ISO 10307-2	% kütle	Maks 0,10	0,01-0,05	Maks 0,10	Maks 0,10
Karbon Atığı	ISO 10370	% kütle	Maks 18	2	Maks 18	Maks 0,2
Akma Noktası	ISO 3016	°C	Maks 30	18	Maks 30	Maks (-) 6
Su	ISO 3733	% hacim	Maks 0,50	0,05	Maks 0,50	Maks 0,30
Kül	ISO 6245	% kütle	Maks 0,1	0,01	Maks 0,15	Maks 0,005

**Şekil 5.** Seyir durumunda (%85 SCMR) farklı yakıtlara göre SO_x emisyon oranları

Yakıt içerisinde bulunan SO_x, düşük sıcaklıklarda yoğunlaşmaya başladığında su ile reaksiyonundan meydana gelen sülfirik asit bacada ve baca kazanı metal malzemesinde korozyona neden olmaktadır. Bu nedenle sülfirik asit oluşumunu engellemek için egzoz gazı sıcaklığını belirli bir değer altına indirmek uygun değildir. Maliyet bazında düşünüldüğünde HF-380 akaryakıtı en makul seçenek olmasına rağmen içeriğindeki SO_x miktarından ötürü çevreye diğer yakıtlara göre %77 daha fazla salım yapacağı öngörüldüğü için tercih sebebi değildir (Şekil 5).

4. Sonuç

Bu çalışmada, gemilerde kullanılan termik yağ sisteminin tercih sebepleri araştırılmış ve sistemin çalışma prensibi ile ilgili bilgi verilmiştir. Bunun yanı sıra, ana makinenin MCR değeri %50 ile %100 arasında değiştirilerek, 7 farklı termik yağ (Therminol 72, Therminol 66, Therminol 55, Therminol 59, Shell Thermia D, Syltherm XLT ve Xceltherm 60) ve dört farklı akaryakıt (HFO-380, MGO, VLSFO ve ULSFO) için karşılaştırmalı hesaplamalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki gemilerde baca kazanı kullanımı, özellikle ana makine devri %65'ten fazla iken yakıtlı kazanda önemli ölçüde yakıt tasarrufu sağlamaktadır. Ayrıca bu hesaplar, bütün ısı değiştiriciler ve buhar kazanı eş zamanlı

çalıştırıldıkları varsayımı ile yapılmış olup, gerçekte karşılığı olmadığından birçok senaryoda sadece baca kazanı çalışır durumdayken dahi geminin ısıtma ihtiyacını karşılayabilecek durumda olabilir. Baca kazanları, ana makine egzoz gazı ile çalıştılarından dolayı hem maliyet olarak işletmeciye hem de zararlı egzoz salımlarını azaltması yönünden de çevreye büyük bir fayda sağlamaktadır. Ayrıca VLSFO akaryakıtı hem maliyet hem de sahip olduğu düşük SO_x miktarı sebebi ile yakıtlı kazanlar için makul bir akaryakıt seçeneği olduğu gözlemlenmiştir.

5. Kaynaklar

Akman, M. (2017). *Bir Petrol Tankeri İçin Organik Rankine Çevrimi Atık Isı Geri Kazanım Sisteminin Termodinamik Analizi* [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. <http://hdl.handle.net/11527/15805>

Akman, M., & Ergin, S. (2019). An investigation of marine waste heat recovery system based on organic Rankine cycle under various engine operating conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 233(2), 586-601. <https://doi.org/10.1177/1475090218770947>

Akman, M., & Ergin, S. (2021). Thermo-environmental analysis and performance optimisation of transcritical organic Rankine cycle system for waste heat recovery of a marine diesel engine. *Ships and Offshore Structures*, 16(10), 1104-1113. <https://doi.org/10.1080/17445302.2020.1816744>

Aygül, Ö., & Baştuğ, S. (2020). Deniz Taşımacılığı Kaynaklı Hava Kirliliği ve İnsan Sağlığına Etkisi. *Journal of Maritime Transport and Logistics*, 1(1), Art. 1.

Başhan, V., & Kökkülünk, G. (2020). Exergoeconomic and air emission analyses for marine refrigeration with waste heat recovery system: A case study. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 19(3), 147-160. <https://doi.org/10.1080/20464177.2019.1656324>

Bogdanowicz, A., & Kniaziewicz, T. (2020). Marine Diesel Engine Exhaust Emissions Measured in Ship's Dynamic Operating Conditions. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 20(22), 6589. <https://doi.org/10.3390/s20226589>

CEAS engine calculations. (2022). MAN Energy Solutions. <https://www.man-es.com/marine/products/planning-tools-and-downloads/ceas-engine-calculations>

Çolak, S. (2015). *Gemi İşletmeciliğinde Kimyasal Tanker Ve Kuru Yük Gemisi Yatırım Analizleri* [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. <http://hdl.handle.net/11527/9028>

Delibaş, H. M., & Kayabaşı, E. (2021). Energy, environment and economy assessment of waste heat recovery technologies in marine industry. *The International Journal of Materials and Engineering Technology*, 4(2), Art. 2.

Dincer, I., & Al-Muslim, H. (2001). Thermodynamic analysis of reheat cycle steam power plants. *International Journal of Energy Research*, 25(8), 727-739. <https://doi.org/10.1002/er.717>

Domingues, A., Santos, H., & Costa, M. (2013). Analysis of vehicle exhaust waste heat recovery potential using a Rankine cycle. *Energy*, 49, 71-85. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.11.001>

Dzida, M. (2009). On the possible increasing of efficiency of ship power plant with the system combined of marine diesel engine, gas turbine and steam turbine, at the main engine—Steam turbine mode of cooperation. *Polish Maritime Research*, 16(1), 47-52. <https://doi.org/10.2478/v10012-008-0010-z>

El-Taybany, A., Moustafa, M. M., Mansour, M., & Tawfik, A. A. (2019). Quantification of the exhaust emissions from seagoing ships in Suez Canal waterway. *Alexandria Engineering Journal*, 58(1), 19-25. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.11.016>

Güneş, Ü. (2013). *Gemilerde atık ısı geri kazanım yöntemlerinin teknik ve ekonomik yönden incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi]. <http://dSPACE.yildiz.edu.tr/xmlui/handle/1/2702>

Güneş, Ü., & Karakurt, A. S. (2015). Exergy And Economic Analysis Of Dual Pressure Waste Heat Recovery Boiler. *International Journal of Advances in Mechanical and Civil Engineering*, 2(5), 41-43.

Heat system design. (2022). <https://heatmaster.nl/heat-system-design>

IMO. (2018). Initial IMO GHG Strategy.

<https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Reducing-greenhouse-gas-emissions-from-ships.aspx>

Kiliç, A. (2009). Marmara Denizi'nde Gemilerden Kaynaklanan Egzoz Emisyonları. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(2), Art. 2.

Kökkülünk, G., Başhan, V., Kaya, A., Sönmez, H., & Sarica, A. (2017, Aralık 21). *Design and Calculation of the Waste Heat Recovery Potential for a Bulk Carrier Marine Diesel Generator*. 3rd Conference on Advances in Mechanical Engineering, ISTANBUL.

Köroğlu, T., & Söğüt, O. S. (2017). Advanced exergy analysis of an organic Rankine cycle waste heat recovery system of a marine power plant. *Journal of Thermal Engineering*, 3(2), Art. 2. <https://doi.org/10.18186/thermal.298614>

Ma, Z., Yang, D., & Guo, Q. (2012). Conceptual Design and Performance Analysis of an Exhaust Gas Waste Heat Recovery System for a 10000TEU Container Ship. *Polish Maritime Research*, 19(2), 31-38. <https://doi.org/10.2478/v10012-012-0012-8>

Marine Fuel and Lubricants: IndianOil. (2022). <https://iocl.com/marine-oils>

Nugroho, T. F., Busse, W., Wardhana, E. M., & Panggabean, J. I. O. (2020). Heat Transfer Analysis of Thermal Oil Plant on Fuel Oil Tanks of 17500 LTDW Product Oil Tanker. *International Journal of Marine Engineering Innovation and Research*, 2(2), Art. 2. <https://doi.org/10.12962/j25481479.v2i2.2615>

Rotterdam Bunker Prices. (2022, Kasım 24). Ship & Bunker. <https://shipandbunker.com/prices/emea/nwe/nl-rtm-rotterdam>

Saraçoğlu, H., Deniz, C., & Kiliç, A. (2013). An Investigation on the Effects of Ship Sourced Emissions in Izmir Port, Turkey. *The Scientific World Journal*, 2013, e218324. <https://doi.org/10.1155/2013/218324>

Shell Thermia Oil D. (2022). *Southern Lubricants*. <https://www.southernlubricants.co.uk/lube-library/shell-thermia-oil-d/>

SYLTHERM™ XLT. (2022). <https://www.dow.com/en-us/pdp.syltherm-xlt-heat-transfer-fluid.23834z.html>

Therminol Heat Transfer Fluids. (2022). <https://www.therminol.com/resources/fluid-selection>

XCELTHERM® 600. (2022). *Radco Ind.* <https://www.radcoind.com/fluid/xceltherm-600/>

İndisler	
C_p	Özgül ısı (kJ/kg. K)
h	Özgül entalpi (kJ/kg)
HFO-380	Ağır akaryakıt
IMO	Uluslararası denizcilik örgütü
ISO	Uluslararası standardizasyon kuruluşu
LHV	Alt ısı değer (kJ/kg)
MGO	Deniz tipi gaz yakıt
\dot{m}	Kütleli debi (kg/s)
P	Basınç (kPa)
ppm	Milyonda bir parçacık
\dot{Q}	Isı enerjisi (kJ/s)
s	Özgül entropi (kJ/kg. K)
SCMR	Ana makine yüzdeleri yük
SFOC	Özgül akaryakıt tüketimi
T	Sıcaklık (K)
ULSFO	Çok düşük sülfür içerikli akaryakıt
VLSFO	Düşük sülfür içerikli akaryakıt
η	Verim
Δ	Değişim
Alt indisler	
ba	Baca kazanı çıkışı egzoz gazı
bk	Baca kazanı
ç	Çıkan
eg	Egzoz gazı
g	Giren
p	Pompa
ty	Termik yağ
yk	Yakıtlı kazan