



Investigation of the effect of dead state temperatures on engine performance for a phthalocyanine-gasoline blend fuel in an internal combustion engine

İrfan Uçkan^{1*}, Ahmet Yakın², Beyza Cabir³

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Van Yuzuncu Yıl University, 65080, Van, Türkiye

²Van Yuzuncu Yıl University, Department of Motor Vehicles and Transportation, Technologies, Van Vocational School, 65080, Van, Türkiye

³Department of Textile, Clothing, Footwear and Leather, Van Vocational School, Van Yuzuncu Yıl University, 65080, Van, Türkiye

Highlights:

- Experimental testing of a novel phthalocyanine-gasoline blend in an internal combustion engine
- Effect of reference dead state temperature on exhaust gas exergy behavior
- Phthalocyanine is being evaluated as a new generation fuel additive

Keywords:

- Exergy
- Phthalocyanine
- Alternative fuels
- Internal combustion engine

Article Info:

Research Article

Received: 27.11.2025

Accepted: 28.03.2026

DOI:

10.17341/gazimmfd.1830857

Correspondence:

Author: İrfan Uçkan
e-mail: irfanuckan@yyu.edu.tr
phone: +90 535 888 4558

Graphical/Tabular Abstract

This study developed novel Phthalocyanine -blended fuel mixtures (PG5, PG15, PG25) and assessed their impact on the exergy performance of an internal combustion engine. The investigation focused on how dead-state temperature (T_0) affects both the engine exergy and the exergy of exhaust gases at a constant engine speed of 2200 rpm. Figure A presents the ratio of exhaust exergy destruction to fuel exergy. Analysis of the figure shows that the percentage of exergy destruction within the fuel exergy increases steadily with rising temperature for all fuel blends containing different Phthalocyanine ratios. A significant finding of this study is that the exergy destruction in the exhaust gases represents nearly 50% of the fuel exergy supplied to the engine. In general, the main conclusion that can be drawn from the figure is that as the phthalocyanine content increases, the exergy destruction in the fuel exergy decreases but the dead state temperature increases it.

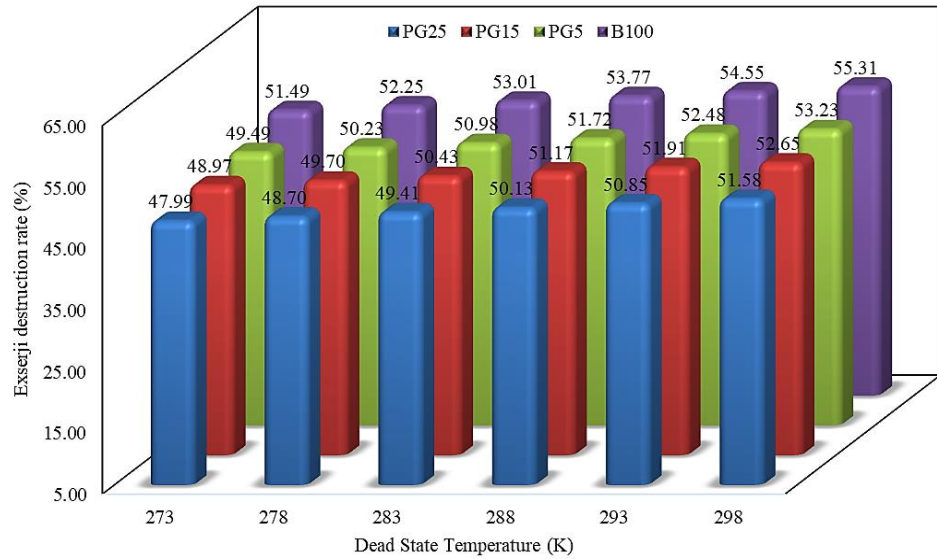


Figure A. The change in the ratio of exhaust exergy destruction to fuel exergy with dead-state temperature

Purpose:

This study aimed to investigate the thermodynamic performance of Phthalocyanine -gasoline fuel blends, particularly their sensitivity to variations in dead-state temperature (T_0).

Theory and Methods:

Our experimental study revolves around four specially formulated fuel samples designed to enhance the performance of commercial gasoline. The obtained data were analyzed within the framework of the second law of thermodynamics to investigate the effect of dead-state temperature.

Results:

According to the results obtained, PG25, one of the newly obtained fuel mixtures, showed superior performance compared to gasoline and other fuel mixtures.

Conclusion:

It has been revealed that Phthalocyanine-Gasoline blends are a more efficient fuel than pure gasoline.



İçten yanmalı bir motorda ftalosiyanın -benzin karışımı bir yakıt için ölü hâl sıcaklıklarının motor performansına etkisinin incelenmesi

İrfan Uçkan^{1*}, Ahmet Yakın², Beyza Cabir³

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 65080, Van, Türkiye

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Motorlu Taşıtlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Van Meslek Yüksekokulu, 65080, Van, Türkiye

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van Meslek Yüksekokulu, Tekstil, Giyim, Ayakkabı ve Deri Bölümü, 65080, Van, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Yeni bir ftalosiyanın-benzin karışımının içten yanmalı motorda deneysel olarak test edilmesi
- Referans ölü hal sıcaklığının egzoz gazı ekserji davranışına etkisi
- Ftalosiyanın, yeni nesil bir yakıt katkı maddesi olarak değerlendirilmesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 27.11.2025

Kabul: 28.03.2026

DOI:

10.17341/gazimmfd.1830857

Anahtar Kelimeler:

Ekserji,
ftalosiyanın,
alternatif yakıtlar,
içten yanmalı motor

ÖZ

Bu çalışmada, kıvılcım ateşlemeli (SI) bir motorun termodinamik performansı üzerinde yeni bir yakıt katkı maddesi olan Ftalosiyanın'ın etkileri ekserji analizi yöntemiyle deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler; saf benzin (B100) ve hacimsel olarak farklı oranlarda Ftalosiyanın içeren karışımlar %5 ftalosiyanın %95 benzin karışımı, %15 ftalosiyanın %85 benzin karışımı, %25 ftalosiyanın %75 benzin karışımından oluşan yakıtlar (PG5, PG15 ve PG25) ile 2200 dev/dak sabit motor hızında gerçekleştirilmiştir. Analiz kapsamında, metodolojik bir parametre olan ölü hal sıcaklığının (T_0) 273 K'den 298 K'ye yükseltilmesinin yanma ürünleri ve ekserji yıkımı üzerindeki etkileri kantitatif olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, Ftalosiyanın katkısının yanma sürecindeki tersinmezlikleri önemli ölçüde azalttığını ortaya koymuştur. Tüm çalışma koşullarında en yüksek termodinamik optimizasyon PG25 karışımı ile elde edilmiştir. 273 K ölü hal sıcaklığında PG25'in ekserji yıkım oranı 9,55 kW olarak hesaplanırken, bu değer B100 yakıtı için 13,57 kW seviyesindedir; bu durum PG25 kullanımıyla ekserji yıkımında yaklaşık %42'lik bir iyileşme anlamına gelmektedir. Metodolojik açıdan T_0 artışı, tüm yakıt türlerinde N_2 ve O_2 ekserjilerini düşürürken, CO ve CO_2 ekserjilerinde artışa neden olmuştur. Toplam egzoz ekserji akımı incelendiğinde, 273 K'de PG25 yakıtı 2,32 kW ile en düşük değeri gösterirken, B100 4,23 kW ile en yüksek kaybı sergilemiştir. Sonuç olarak, Ftalosiyanın katkısının, özellikle %25 konsantrasyonda, SI motorların ekserjetik verimliliğini artırmada ve enerji kayıplarını minimize etmede yüksek bir potansiyele sahip olduğu tespit edilmiştir.

Investigation of the effect of dead state temperatures on engine performance for a phthalocyanine-gasoline blend fuel in an internal combustion engine

H I G H L I G H T S

- Experimental testing of a novel phthalocyanine-gasoline blend in an internal combustion engine
- Effect of reference dead state temperature on exhaust gas exergy behavior
- Phthalocyanine is being evaluated as a new generation fuel additive

Article Info

Research Article

Received: 27.11.2025

Accepted: 28.03.2026

DOI:

10.17341/gazimmfd.1830857

Keywords:

Exergy,
phthalocyanine,
alternative fuels,
internal combustion engine

ABSTRACT

In this study, the effects of Phthalocyanine, a novel fuel additive, on the thermodynamic performance of a spark-ignition (SI) engine were experimentally investigated through exergy analysis. The experiments were conducted at a constant engine speed of 2200 rpm using pure gasoline (B100) and gasoline-phthalocyanine blends (PG5, PG15, and PG25) containing 5%, 15%, and 25% phthalocyanine by volume, respectively. Within the scope of the analysis, the quantitative impacts of increasing the dead-state temperature (T_0)-a critical methodological parameter-from 273 K to 298 K on combustion products and exergy destruction were evaluated. The findings revealed that the addition of Phthalocyanine significantly mitigated the irreversibilities inherent in the combustion process. Across all operating conditions, the PG25 blend yielded the highest level of thermodynamic optimization. Specifically, at a dead-state temperature of 273 K, the exergy destruction rate for PG25 was calculated as 9.55 kW, whereas this value stood at 13.57 kW for B100; this indicates an improvement of approximately 42% in exergy destruction with the use of PG25. From a methodological perspective, the increase in T_0 led to a decrease in N_2 and O_2 exergies while resulting in an increase in CO and CO_2 exergies for all fuel types. Analysis of the total exhaust exergy flow showed that at 273 K, PG25 exhibited the lowest value (2.32 kW), while B100 demonstrated the highest loss (4.23 kW). Consequently, it was determined that Phthalocyanine additives, particularly at a 25% concentration, possess high potential for enhancing the exergetic efficiency of SI engines and minimizing energy losses.

1. Giriş (Introduction)

Motor tasarımı ve optimizasyonunda temel ölçüt olan termal verimlilik, enerji dönüşümünün yalnızca nicel boyutunu yansıtır ve Termodinamiğin Birinci Yasası'nın kısıtlamalarına tabidir. Fosil yakıtlı içten yanmalı motorların (İYM) performansının sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda iyileştirilmesi gerekliliği, analiz metodolojisinde bir paradigma kaymasını zorunlu kılmıştır. Bu bağlamda, ekserji analizi, entropi üretimiyle ilişkilendirilen geri dönüşmez kayıpların kaynağını ve büyüklüğünü belirleyerek sisteme giren yakıtın iş yapma kalitesini değerlendirir. Enerjinin aksine, ekserji bir sistemin sahip olduğu kullanılabilir potansiyeli gösterir ve özellikle yanma reaksiyonları, ısı transferi ve akış sürtünmeleri gibi temel İYM süreçlerindeki iş potansiyeli yıkımını açıkça ortaya koyar. Dolayısıyla ekserji analizi, mühendislik iyileştirmeleri için yüksek öncelikli alanları tanımlayan tutarlı bir araç olarak öne çıkmaktadır. Ekserji analizi farklı birçok sistemin performansını değerlendirir önemli bir metottur [1-3]. Enerji analizlerinde tersinmezlikler dikkate alınmazken ekserji analizleri tersinmezlikler ve bu tersinmezliklerin nereden kaynaklandığını ortaya çıkarmaktadır [4, 5].

Yanma süreçlerinin ekserji analizine dayalı değerlendirilmesi, enerji dönüşüm sistemlerinin verimliliğini anlamak ve optimize etmek açısından kritik bir yaklaşım olarak literatürde geniş şekilde incelenmiştir. Taniguchi vd. [6], yanma ve enerji dönüşüm süreçlerinde ekserji analizinin temel kavramlarını ele almış ve özellikle yüksek sıcaklıklı enerji dönüşümlerinde ekserji kayıplarının önemini vurgulamışlardır. Bu çalışma, enerji analizlerinin sağladığı bilgiler ile ekserji analizlerinin sağladığı kullanılabilirlik perspektifi arasındaki farkı ortaya koyarak, yanma süreçlerinde tersinmezliklerin anlaşılmasına önemli bir zemin hazırlamaktadır.

Bu temel kavramsal çerçeve, analitik düzeyde incelenen yanma süreci çalışmalarını derinleştirilmiştir. Örneğin, son yıllarda yapılan bir çalışmada yanma sırasında meydana gelen ekserji yıkımı ve sistemin genişleme işi potansiyeli detaylı olarak ele alınmış ve yanma sıcaklığı ile çevre koşullarındaki değişimlerin ekserji yıkımına etkileri gösterilmiştir [7]. Bu yaklaşım, literatürde tanımlanan temel kavramları, yanma sürecinin mekanizması ve ekserji yıkımı ilişkisi bağlamında somutlaştırmaktadır.

Daha uygulamalı bir perspektif sunan bir diğer çalışma ise, mikroporöz ortamda karışık yakıt-hava yanmasının entropi üretimi ve ekserji analizi ile değerlendirilmesini ele almıştır [8].

Farklı yakıt türlerinin içten yanmalı motorların performansı ve ekserji verimliliği üzerindeki etkileri literatürde kapsamlı biçimde incelenmiştir. Erol ve Gülcan [9], atık kızartma yağı bazlı biyodizel (WCOB) karışımları ile çalışan bir dizel motorda enerji ve ekserji analizlerini gerçekleştirerek, biyodizel oranının artmasının ekserji verimini azalttığını ve ekserji yıkımını artırdığını göstermiştir. Baltacıoğlu [10] ise sıkıştırılmalı ateşlemeli bir motorun HCNG (hidrojen + sıkıştırılmış doğal gaz) ve biyodizel karışımlarıyla performans ve ekserji analizini yapmış, alternatif gaz yakıtların motorda önemli değişikliklere yol açtığını ortaya koymuştur. Rakopoulos ve vd., [11] da yüksek oranda hidrojen ile zenginleştirilmiş metan kullanan kıvılcımlı ateşlemeli motorlarda ekserji analizleri yaparak, yakıt bileşiminin motordaki ekserji davranışı üzerinde kritik bir etkiye sahip olduğunu rapor etmiştir. Bu çalışmalar birlikte, farklı yakıt türlerinin ve bileşimlerinin motor ekserjisi ve enerji verimliliği üzerindeki belirleyici rolünü ortaya koymakta ve yakıt seçiminde ekserji analizinin önemini vurgulamaktadır. Ayrıca motor performanslarını iyileştirmek için yakıt içerisine nano parçacıkların ilavesi ile kimyasal enerjinin faydalı işe dönüşüm kalitesini artırarak motor verimi iyileştirilmektedir [12-16].

Farklı motor tipleri ve işletme rejimleri üzerinde yapılan çok sayıda çalışma, İYM ekserji analizinin temel hassasiyetini doğrulamaktadır. Ekserji tabanlı optimizasyon ve performans karşılaştırmalarında, çevresel koşulların doğru tanımlanması veya analiz sonuçlarının normalizasyonu hayati önem taşır [17, 18]. Bu çalışmanın ana odağı olan T_0 referans parametresinin ekserjetik analiz sonuçları üzerindeki kritik hassasiyeti, literatürde özellikle termal santraller ve farklı motor türleri bağlamında detaylıca incelenmiştir. Aşağıdaki bölümde, bu hassasiyetin içten yanmalı motor performansına ve kayıp dağılımına olan etkisini inceleyen temel çalışmalar özetlenmiştir.

Çalışkan ve vd., [19] tarafından yürütülen bir çalışmada, ölü hâl sıcaklığının içten yanmalı motorların ekserji performansı üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Çalışmada, yüksek oleik soya yağı metil esteri (HOME) ile çalışan dört silindri bir dizel motor kullanılmıştır. Çalışmada ölü hâl sıcaklığı $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında değiştirilerek motorun ekserji verimindeki değişimler analiz edilmiştir. Uçkan vd., [20] tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, içten yanmalı motorlarda farklı ölü hâl sıcaklıklarının, bor katkılı ve farklı yakıt türleriyle çalışan motorların termodinamik performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada, 273 K ile 298 K arasındaki ölü hâl sıcaklık aralığı dikkate alınmış ve bu değişimin motorun ekserji performansı, yakıt tüketimi, verimsizlik oranı ve iyileştirme potansiyeli üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Rosen ve Dincer [21] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, termal sistemlerde enerji ve ekserji analiz sonuçlarını etkileyen “ölü hâl” (dead-state) özelliklerinin değişimi incelenmiştir. Çalışma kapsamında, farklı ölü hâl sıcaklıkları ve çevresel şartların enerji ve ekserji değerleri üzerindeki duyarlılıkları değerlendirilmiştir. Sonuçlar, ölü hâl koşullarındaki değişimlerin enerji ve ekserji değerleri ile sistem analiz sonuçlarına etkisinin “makul” değişimler için nispeten küçük olduğunu ortaya koymuştur; özellikle sistem koşulları ile çevre koşulları arasındaki fark büyük olduğunda, ekserji değerlerinin bu değişimlerden yüksek düzeyde etkilenmediği saptanmıştır.

Sezer [22] kıvılcım ateşlemeli motorlarda hız ve yük değişiminin ekserjetik performansa etkisini incelemiş; analizlerinde referans çevre sıcaklığının ikinci yasa verimi üzerindeki duyarlılığını tartışmıştır. Çalışmada, motor yükü arttıkça toplam ekserji veriminin değiştiği, ancak referans sıcaklık değerinin seçiminin hesaplanan verim büyüklüklerini önemli ölçüde etkilemediği vurgulanmıştır.

Bhatti vd., [23] tarafından gerçekleştirilen enerji ve ekserji temelli performans değerlendirmesinde ise farklı çalışma koşullarında içten yanmalı motorların termodinamik kayıpları karşılaştırılmıştır. Çalışma, referans çevre koşullarının sabit kabul edilmesi ile gerçek ortam koşullarının dikkate alınması arasındaki farkların özellikle düşük sıcaklıkta yanma rejimlerinde belirginleştiğini ortaya koymaktadır.

Luo ve vd., [24] farklı araç tiplerinde termoelektrik jeneratörlerin (TEG) performansını enerji, ekserji ve ekonomi açısından karşılaştırarak, dizel kamyonların hem verimlilik hem de maliyet geri dönüş süresi açısından en uygun platform olduğunu göstermişlerdir. Modelleme temelli bir yaklaşım ise Pozzato vd., [25] tarafından geliştirilmiştir. Bu çalışmada ortalama değer (mean-value) tabanlı bir ekserji modeli oluşturulmuş ve motorun uygulanabilir çalışma bölgeleri belirlenmiştir. Referans sıcaklığın, özellikle yanma sonrası gazların kullanılabilir iş potansiyelinin hesaplanmasında önemli rol oynadığı gösterilmiştir.

Catona vd., [26] yanma sürecindeki tersinmezliği azaltmanın, yakıt tipi veya sıkıştırma oranı gibi operasyonel parametrelerle nasıl başarılabileceğini derinlemesine incelemiş; bu da T_0 'ın neden olduğu potansiyel kaybın, mühendislik iyileştirmeleriyle ne ölçüde telafi

edilebileceği sorusunu gündeme getirmiştir. Ancak, yalnızca yanma değil, motora giren hava koşulları da kritik öneme sahiptir. Emme havası sıcaklığındaki değişimin hem hacimsel verimlilik hem de termodinamik süreçler üzerindeki karmaşık etkisi aracılığıyla ekserji performansını nasıl etkilediğini deneysel olarak çalışılmıştır.

Bu çalışmanın yukarıda belirtilen literatürden temel farkı; literatürde içten yanmalı motorların (İYM) ekserji analizi üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde; genellikle etanol, metanol gibi biyoyakıtların veya yaygın olarak bilinen metal bazlı katkı maddelerinin performans üzerindeki etkilerine odaklanıldığı görülmektedir. Ancak, bu çalışmayı mevcut literatürden ayıran temel fark, Ftalosiyanın (Phthalocyanine) bileşiğinin ilk kez bir yakıt katkı maddesi olarak benzinle harmanlanması ve bu yeni karışımın ekserjetik karakteristiklerinin derinlemesine analiz edilmesidir. Geleneksel katkı maddeleri üzerine yapılan araştırmalar çoğunlukla enerji verimliliği ve emisyon çıktılarına temel alırken, bu çalışma Ftalosiyanın-Benzin (PG) karışımlarının termodinamik tersinmezliklerini, farklı referans sıcaklıkları (T_0) altında sayısal olarak modelleyerek literatüre yeni bir perspektif kazandırmaktadır. Özellikle PG25 karışımının, saf benzine kıyasla ekserji yıkımını %42 oranında azaltması, Ftalosiyanın'ın yanma kararlılığı ve iş potansiyeli üzerindeki katalitik etkisini bilimsel olarak kanıtlayan özgün bir bulgudur. Mevcut çalışmaların aksine bu araştırma, sadece yakıtın ısı değerine değil, yanma sonu ürünlerinin (CO , CO_2 , N_2 , O_2) ekserji akımları üzerindeki çevresel sıcaklık hassasiyetine de odaklanarak, yakıt kompozisyonu ile çevre koşulları arasındaki ilişkiyi sistematik bir biçimde ortaya koyan öncü bir çalışma niteliği taşımaktadır. Uygulamanın temel önemi, Ftalosiyanın-benzin karışımlarının (PG5, PG15, PG25) sadece yakıt özelliklerini değil, aynı zamanda motorun ekserjetik verimliliğini ve yanma ürünlerinin termodinamik kalitesini nasıl değiştirdiğini ortaya koymasındadır. Analiz sürecinde, ölü hal sıcaklığındaki (T_0) değişimlerin ekserji yıkımı, kimyasal ekserji girişleri ve egzoz kayıpları üzerindeki duyarlılığı incelenerek, katkı maddesinin farklı çevresel referans koşullarındaki kararlılığı değerlendirilmiştir. Bu çalışma, Ftalosiyanın katkısının yanma sırasındaki tersinmezlikleri azaltma potansiyelini miktarlandırması bakımından literatürde özgün bir yere sahiptir. Elde edilen bulgular, sürdürülebilir motor optimizasyonu ve alternatif yakıt stratejileri için yeni bir metodolojik temel sunarak, biyo-kaynaklı/organometalik katkıların SI motorların enerji yönetimindeki uygulanabilirliğini bilimsel bir zemine oturtmaktadır.

2. Deneysel Metot (Experimental Method)

Bu çalışmada materyal metot üç alt başlık altında incelenmektedir.

2.1. Ftalosiyanın Katkılı Yakıt Dizisinin Hazırlanması (Preparation of Phthalocyanine-Added Fuel Sequence)

Deneysel çalışmamız, ticari benzin yakıtının performansını artırmak amacıyla tasarlanmış, özel olarak formüle edilmiş dört yakıt numunesi etrafında şekillenmektedir. Bu numunelerin oluşturulmasında temel strateji, potansiyel bir yanma iyileştiricisi olarak görülen ftalosiyanın bileşiğinin benzine farklı hacimsel konsantrasyonlarda eklenmesidir.

Yakıt karışımlarının hazırlanması sırasında ftalosiyanın bileşiği öncelikle uygun çözücü içerisinde çözündürülmüş ve homojen bir çözelti elde edilmiştir. Elde edilen çözelti, belirlenen hacimsel oranlarda benzin ile oda sıcaklığında manyetik karıştırıcı yardımıyla karıştırılmıştır. Homojen dağılımın sağlanabilmesi amacıyla karıştırma işlemi belirli bir süre devam ettirilmiş ve hazırlanan yakıt karışımları deneyler öncesinde kapalı cam kaplarda muhafaza edilmiştir. Bu çalışmada, hacimce %5'lik düşük bir konsantrasyondan başlayıp, %25'e kadar çıkan kademeli artışlarla (%5, %15 ve %25) ftalosiyanın çözeltisi içerecek şekilde düzenlenmiştir. Bu geniş aralık, katkı maddesinin etkisini hem seyreltik hem de yüksek konsantrasyonlu koşullarda kapsamlı bir şekilde inceleme imkânı sunmaktadır. Numuneler, saf benzin (B100) referans alınarak, içerdiği ftalosiyanın yüzdesine göre PG5'ten PG25'e kadar sistematik olarak kodlanmıştır. Sonuç olarak, bu karışımlar ftalosiyanın hacminin %5 ile %25 arasında değiştiği ve buna karşılık benzin oranının %95 ile %75 aralığında bulunduğu bir bileşim yelpazesi sunmaktadır. Tüm yakıt karışımlarının bileşen dağılımı Tablo 1'de özetlenmiştir. Araştırmamızda kullanılan aktif bileşen, öncül çalışmalarda [27] detayları verilen sentez yöntemiyle elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan ftalosiyanın bileşiği çinko(II) merkezli süstitü bir ftalosiyanın türevidir. Bileşiğin kimyasal yapısı ve karakterizasyonu daha önce yayımlanan çalışmamızda detaylı olarak verilmiştir [27]. Sentez sonrası saflaştırma işlemleri gerçekleştirilmiş olup, katkı maddesi homojen yapı gösterecek şekilde yakıt hazırlama aşamasında kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan çinko(II) merkezli ftalosiyanın türevi ticari bir ürün olmayıp laboratuvar ortamında sentezlenmiştir. Bu nedenle CAS numarası bulunmamaktadır. Ftalosiyanın yapısının başlangıç bileşiği olan ftalonitril türevi tek kristal X-ışını kırınım analizi ile doğrulanmış ve kristal verisi CCDC 2480537 numarası ile kayıt altına alınmıştır. Deneylerde kullanılan yakıtların fiziksel özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

2.2. Deney sistemi (Experimental system)

Bu çalışmada, saf benzin (B100) ile farklı oranlarda Ftalosiyanın katkısı içeren yakıt karışımlarının (PG5, PG15, PG25) içten yanmalı motor performansı üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmalar, Gazi Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Laboratuvarı'nda kurulan ve bu araştırma için yapılandırılan bir test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, motorun tam yük koşullarında 2200 dev/dak hızına göre farklı ölü hal sıcaklıklarının etkisi incelenmiştir.

Test düzeneğine ait genel yerleşim Şekil 1'de gösterilmektedir. Deneylerde motor performans parametrelerinin belirlenmesi amacıyla McClure marka bir elektrikli dinamometre kullanılmıştır. 6500 dev/dak hıza kadar 30 kW güç üretebilen bu dinamometre, motorun farklı yük koşullarındaki çalışma karakteristiklerinin doğru biçimde simüle edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu sayede motorun hem mekanik hem de termodinamik performans göstergeleri yüksek doğrulukla elde edilmiştir.

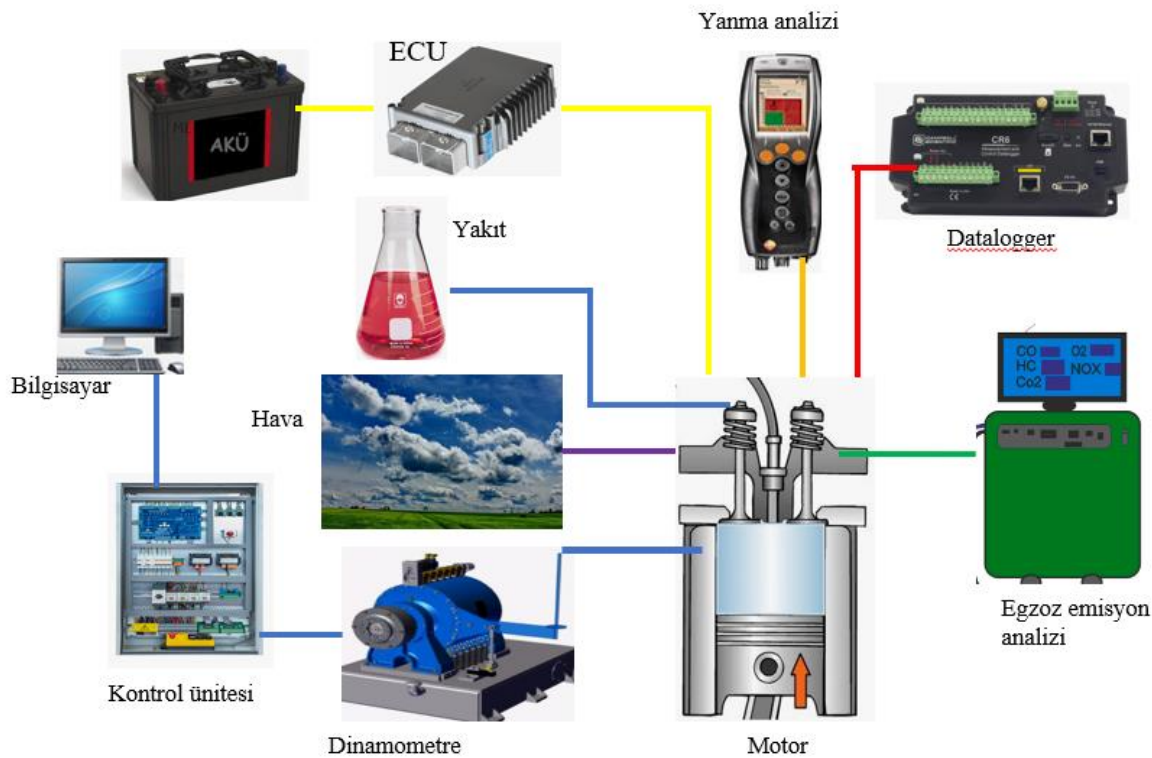
Çalışmada kullanılan test motoruna ilişkin teknik veriler Tablo 3'te sunulmuş olup, bu bilgiler deneylerin değerlendirilmesi için temel referans niteliği taşımaktadır. Elde edilen tüm veriler, deneysel koşullardaki değişkenlerin motorun genel performansı üzerindeki etkilerini ortaya koymak amacıyla analiz edilmiştir.

Tablo 1. Ftalosiyanın ve benzinin hacimsel karışımları (Volumetric mixtures of phthalocyanine and gasoline)

Yakıt Kodu	Ftalosiyanın Oranı	Benzin Oranı
B100	%0 (Saf Benzin)	%100
PG5	%5	%95
PG15	%15	%85
PG25	%25	%75

Tablo 2. Deneylerde kullanılan yakıtların fiziksel ve kimyasal özellikleri (Physical and chemical properties of the fuels used in the experiments)

Teknik Özellikler	B100	PG5	PG15	PG25
RON (Araştırma oktan sayısı)	100	101,5	104,5	107,5
MON (Motor oktan sayısı)	95	96	97,5	100,5
Alt ısııl değer (MJ/kg)	43	44,3	43	41,7
Yoğunluk (g/cm ³)	0,7	0,73	0,79	0,85
Buharlaşıma ısısı (kJ/kg)	340	373	439	505
Molekül (g/mol)	100	102,5	107,5	112,5



Şekil 1. Deney sisteminin şematik gösterimi (Schematic representation of the experimental system)

Tablo 3. Test motorunun özellikleri (Specifications of the test engine)

Motor Özellikleri	Açıklama
Motor Markası	Ricardo Hydra
Silindir Sayısı	1
Sıkıştırma Oranı	10:1
Maksimum Devir	5400 dev/dak (rpm)
Maksimum Güç	15 kW (5400 dev/dak'da)
Minimum Devir	1200 dev/dak (rpm)
(Rölanti)	
Silindir Çapı (Bore)	80,26 mm
Strok Mesafesi	88,90 mm
Supap Sistemi	Üstten çift eksantrikli (DOHC), iki supaplı
Yakıt Sistemi	Port (Çok noktalı) enjeksiyon
Soğutma Sistemi	Sıvı soğutmalı

2.3 Deney Düzenegi ve Belirsizlik Analizi (Experimental Setup and Uncertainty Analysis)

Deney yakıtlarının emisyonları, teknik özellikleri Tablo 4'te sunulan Bosch firmasına ait BEA 060 model egzoz gazı analiz cihazı ile ölçülmüştür. Motor test cihazının ölçüm belirsizlikleri ise Tablo 5'te verilmiştir.

Bir parametrenin değeri ölçülürken toplam hatalar; imalat hataları, sabit hatalar ve rastgele hataları belirlemek amacıyla Eş. 1 kullanılarak farklı bağımsız değişkenlerden oluşan W_R belirsizliği hesaplanmaktadır [28].

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \cdots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

Burada R ; $x_1, x_2, \dots, x_n$ bağımsız değişkenlerine bağlı bir fonksiyonu, $w_1, w_2, \dots, w_n$ ise bu değişkenlerin belirsizliklerini temsil etmektedir. Özgül yakıt tüketimiyle ilgili yapılan hesaplamalar sonucunda, efektif özgül yakıt tüketimi (bsfc) belirsizliği $\pm 1,04$ olarak bulunmuştur.

2.4. Enerji ve Ekserji Analizi (Energy and Exergy Analysis)

Bir sistemin termodinamik verimliliğinin tam olarak anlaşılması, yalnızca nicel bir değerlendirme sunan enerji analizini aşarak, enerjinin kalitesini inceleyen ekserji analizini zorunlu kılar [29]. Ekserji analizi, tersinmezliklerin ve entropi üretiminin yol açtığı kullanılabilir iş potansiyeli kayıplarını hassasiyetle lokalize etme yeteneği sunar [30]. Yüksek performanslı termal sistemlerin

Tablo 4. Egzoz gazı analiz cihazının teknik özellikleri (Technical specifications of the exhaust gas analyzer)

Parametre	Çalışma Aralığı	Çözünürlük	Hassasiyet
CO	%0–10 hacimce	%0,001 hacimce	±%5
CO ₂	%0–18 hacimce	%0,01 hacimce	±%5
HC	0–9999 ppm hacimce	1 ppm hacimce	±%5
O ₂	%0–22 hacimce	%0,010 hacimce	±%5
NO	0–5000 ppm hacimce	1 ppm hacimce	±%4
Lambda	0,5–9,9999	0,001	—

Tablo 5. Hassasiyetler ve belirsizlikler (Sensitivities and uncertainties)

Ölçüm	Çalışma Aralığı	Ölçüm Hassasiyeti	Belirsizlik (%)
Motor Torku (Nm)	0-80Nm	0,01 Nm	± 0,25
Yakıt Tüketimi (g)	-----	0,01g	± 0,1
Motor Devri (dak ⁻¹)	0-7000 1/dk	1 1/dk	± 1
Sıcaklık (°C)	-----	----	± 1
Ateşleme zamanı	ÜÖN Öncesi 70° - ÜÖN Sonrası 20°	1° KMA	----

tasarımında, enerji analizinin gözden kaçırdığı, gerçek verimsizlik kaynaklarının kesin tespiti için ekserji temelli yaklaşımlar kritik öneme sahiptir [31].

Termodinamiğin temel ilkelerinden olan Birinci Yasa uyarınca enerji analizi gerçekleştirildiğinde, sisteme tanımlanan kontrol hacmini terk eden toplam enerji miktarı ile bu hacme dahil olan toplam enerji miktarı arasında bir korunum vardır [21]. Bu enerjinin korunumu Eş. 2’de verilmektedir.

$$\dot{E}_g = \dot{E}_c \quad (2)$$

Burada ($\dot{E}_g$) Kontrol hacmine giren enerji ve ($\dot{E}_c$) kontrol hacminden çıkan enerjidir. Enerji dengesine göre kontrol hacmine giren ve çıkan enerjiler Eş. 3, Eş. 4, Eş. 5 ve Eş. 6’da verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\dot{E}_{yakıt} + \dot{E}_{hava} = \dot{E}_{i\dot{s}} + \dot{E}_{eksoz} + \dot{E}_{kayıp} \quad (3)$$

$$\dot{E}_{yakıt} = \dot{m}_{yakıt} \cdot AID \quad (4)$$

$$\dot{E}_{hava} = \dot{m}_{hava} \cdot c_{phava} (T_{hava} - T_0) \quad (5)$$

$$\dot{E}_{work} = \dot{W} \quad (6)$$

Motordan elde edilen iş Eş. 7’ye göre hesaplanmaktadır.

$$\dot{W} = \frac{2\pi NT}{60 \times 1000} (kW) \quad (7)$$

Bu denklemlerde kullanılan $\dot{m}_{yakıt}$, AID, N, T ve $\dot{m}_{hava}$ değişkenleri sırasıyla şu şekilde tanımlanmaktadır: yakıtın kütleli debisi (kg/s), yakıtın alt ısı değeri (kJ/kg), motor devri (d/d), fren torku (Nm) ve havanın kütleli debisi (kg/s).

Yakıt ekserjisinin alt ısı değerini hesaplayan Eş. 4’ün açılımı yapıldıktan sonra yakıt ekserjisi Eş. 8’e göre hesaplanmaktadır. Ayrıca bu denklemdeki yakıtın kimyasal faktör değeri de (φ) Eş. 9’ye göre hesaplanmaktadır [32].

$$\dot{E}_{x_{yakıt}} = \dot{m}_{yakıt} LHV \varphi \quad (8)$$

$$\varphi = 1,0401 + 0,1728 \left(\frac{H}{C} \right) + 0,0432 \left(\frac{O}{C} \right) + 0,2169 \left(\frac{S}{C} \right) \quad (9)$$

$$\left(1 - 2,0628 \left(\frac{H}{C} \right) \right) \quad (9)$$

Burada φ yakıtın kimyasal faktör değerini ifade etmektedir. Buna ek olarak, yakıtın elementel bileşimini tanımlamak üzere kullanılan H, C, O ve S harfleri, yakıtın kütlece sırasıyla hidrojen, karbon, oksijen ve kükürt kütle oranlarını temsil etmektedir. Egzoz ekserjisi Eş. 10’e göre hesaplanmaktadır (33)

$$\dot{E}_{x_{egzoz}} = \sum \dot{m}_i \cdot (\varepsilon_{ch} + \varepsilon_{phs}) \quad (10)$$

Bu denklemde ki fiziksel ve kimyasal ekserjilerde Eş. 11 ve Eş. 12’göre hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon_{chem} = \bar{R} T_o \ln \left(\frac{y}{y_e} \right) \quad (11)$$

$$\varepsilon_{phs} = [(h - h_o) - T_o (s - s_o)] \quad (12)$$

3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Bu çalışmada Ölü Hal Sıcaklığındaki (T_0) sistematik değişimlere 0 °C ile 25 °C arasındaki yanma sonu gazlarının değişimi ve motor ekserjisi incelenmiştir. Elde edilen bulgularla, Ftalosiyonin kullanımının neden olduğu performans değişimleri ile çevresel referans koşullarının metodolojik hassasiyet arasındaki etkileşim saptanarak, biyo-yakıt katkılarının termodinamik optimizasyonunda T_0 seçiminden kaynaklanan sonuç varyasyonlarının etkileri incelenecektir.

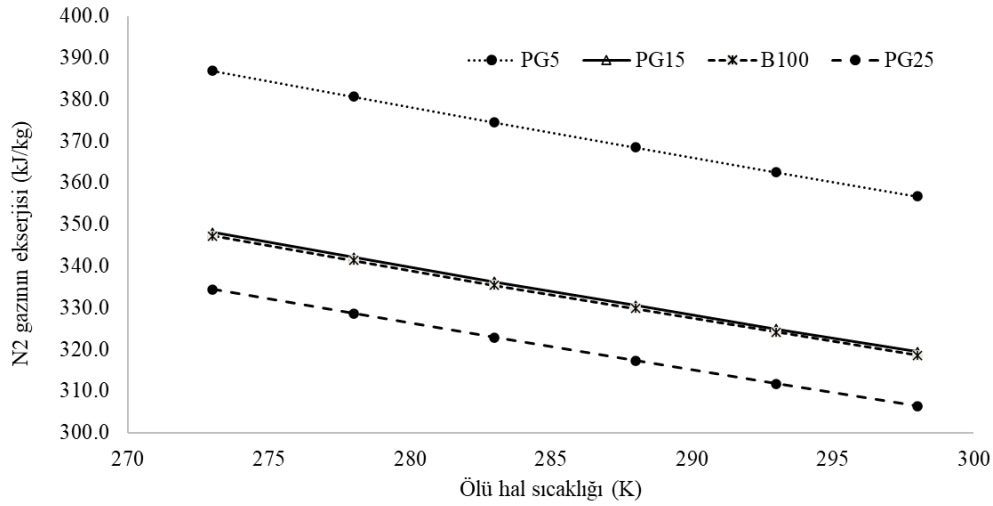
Şekil 2’de içten yanmalı motorun 2200 dev/dak sabit işletme rejiminde, yanma ürünlerinin temel bileşeni olan azot (N_2) ekserjisi üzerindeki çevresel ve yakıt kompozisyonu etkilerini kapsamlı bir şekilde ortaya koymuştur. Bulgulara göre, tüm yakıt formülasyonlarında ortak bir termodinamik korelasyon olarak, ölü hal sıcaklığındaki (T_0) artış, N_2 ekserjisinde sistematik bir düşüşe neden olmuştur. Bu durum, çevre referans sıcaklığının artmasıyla birlikte sistemin kullanılabilir iş potansiyelinin azalmasından kaynaklanmaktadır. PG5 yakıtı tüm sıcaklık aralığında en yüksek ekserji değerine sahiptir. 273 K’de yaklaşık 386.88 kJ/kg olan değer, 298 K’de yaklaşık 356.74 kJ/kg seviyesine gerileyerek yaklaşık olarak %7–8 oranında bir azalma göstermiştir. Benzer şekilde PG15 ve B100 için de doğrusal azalma eğilimi gözlenmiş olup, bu iki yakıtın birbirine oldukça yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. PG25 yakıtı ise tüm sıcaklık aralığında en düşük ekserji değerlerine sahiptir. 273 K’de yaklaşık 335 kJ/kg olan değer 298 K’de yaklaşık 307 kJ/kg seviyesine düşmüştür. Bu durum, yakıt kompozisyonundaki değişimin sistem ekserji performansını olumsuz etkilediğini göstermektedir. Yakıtlar arası değerlendirmede ise, PG katkı seviyesi arttıkça Azot gazının ekserjisi düşmektedir (PG5 > B100 > PG15 >

PG25). Özellikle PG25 yakıtı 298 K'de 306,35 kJ/kg ile incelenen tüm koşullarda en düşük azot gazı atık ekserji potansiyeline sahip olduğunu kanıtlamaktadır.

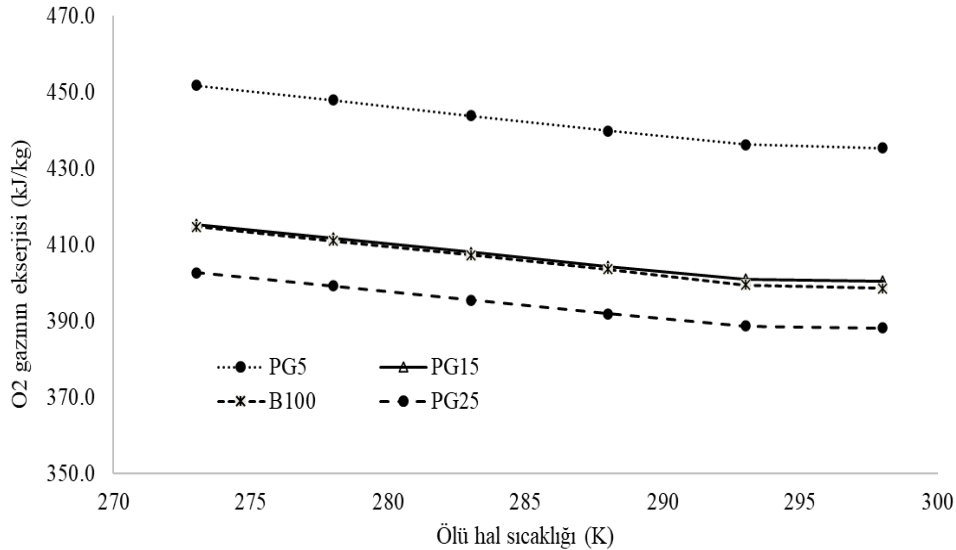
Şekil 3, motorun sabit devirde (2200 dev/dk) çalışması sırasında, yanma ürünleriyle atılan ekserjinin iki ana faktör tarafından kontrol edildiğini göstermektedir. Birincisi, çevresel sıcaklığın O_2 gazının ekserjisini azaltacak yönde etkidir. Ölü hal sıcaklığının 273 K'den 298 K'e yükselmesi, en yüksek değere sahip PG5 yakıtının ekserjisini 451,78 kJ/kg'dan 435,39 kJ/kg'a düşürmektedir. Bu düşüşün ana sebebi yakıtın fiziksel ekserjisindeki azalmadan kaynaklanmaktadır. İkincisi, yakıt karışım oranlarının, ekserji potansiyelinde %16,4'e varan (PG5 maksimum 451,78 vs. PG25 minimum 388,20 kıyaslamasıyla) bir değişim yaratmaktadır. Bu değişimde, PG5 tüm yakıtlar arasında en yüksek ekserji değerlerini korurken (örneğin 298 K'de 435,39 kJ/kg), PG25 (388,20 kJ/kg) en düşük potansiyeli sergilemiştir. Saf benzin olan B100 ise 399,70 kJ/kg'lık ekserjiye sahiptir. PG5'e göre yaklaşık %8,9 daha düşük bir ekserji değeri gösterirken, en düşük değere sahip PG25'e göre ise yaklaşık %3,0 daha yüksek ekserjiye sahiptir.

Şekil 4'te elde edilen verilere göre, yanma ürünlerinden CO (karbon monoksit) gazının ekserjisi incelendiğinde, PG25 yakıtı incelenen tüm yakıtlar arasında en düşük ekserji potansiyeline sahip yakıt olarak kendini konumlandırmıştır. Bu şekilden de görüldüğü gibi CO gazının ekserjisi ölü hal sıcaklığına bağlı olarak artarken O_2 ve N_2 gazlarının ekserjisi azalma yönünde gerçekleşmiştir. Ölü hal sıcaklığındaki (273 K'den 298 K'e) artış, PG25'in ekserjisini 1278,50 kJ/kg'dan 1336,31 kJ/kg'a yükseltmesine rağmen, bu değer en yüksek değere sahip PG5'in (1387,43 kJ/kg) ekserjisinden yaklaşık %3,7 daha düşüktür. Aynı zamanda, B100 yakıtının (1348,75 kJ/kg) ekserjisinden de yaklaşık %0,9 daha düşük kalarak, PG25'in yanma süreçlerinin atık ekserji kaybını tutarlı bir şekilde en aza indirme yeteneğine sahip olduğunu göstermektedir.

Şekil 5'te, yanma ürünlerinin CO_2 (karbon dioksit) gazının özgül ekserjisinin ölü hal sıcaklığı ile değişimi verilmektedir. Şekil 4'teki CO gazından elde edilen bulgulara paralel bir eğilimi göstermektedir. CO_2 gazının ekserji değerleri CO gazının ekserji değerlerinden daha düşük bir seviyeye çekmiştir. PG5, 298 K'de CO referansında 1387,43 kJ/kg iken, CO_2 referansında 785,38 kJ/kg'a gerilemiştir.



Şekil 2. N_2 egzoz gazı ekserjisinin ölü hal sıcaklığına göre değişimi (Variation of N_2 exhaust gas exergy with dead-state temperature)



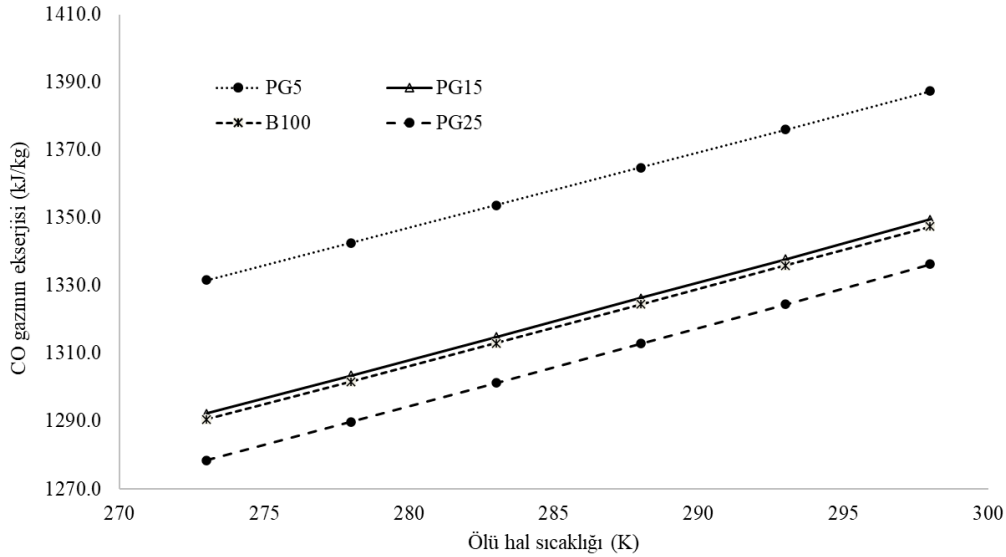
Şekil 3. O_2 egzoz gazı ekserjisinin ölü hal sıcaklığına göre değişimi (Variation of O_2 exhaust gas exergy with dead-state temperature)

Yakıtlar arası kıyaslamada ise, PG25 yakıtının termodinamik avantajı korunmuştur. PG25 (732,36 kJ/kg), B100'e (745,25 kJ/kg) göre yaklaşık %1,7 daha düşük bir ekserji değerine sahiptir. Bu değer, en yüksek ekserjiye sahip PG5'in (785,38 kJ/kg) değerinden ise yaklaşık %6,8 daha düşüktür. O₂ ve CO₂ gazlarının ekserjisinin diğer egzoz gazlarının ekserjilerinden farklı olarak ölü hal sıcaklığını artmasına bağlı olarak artma eğilimi göstermektedir. Bu artışın nedeni ölü hal sıcaklığının artmasıyla birlikte bu gazların kimyasal ekserjilerinin artmasından kaynaklanmaktadır.

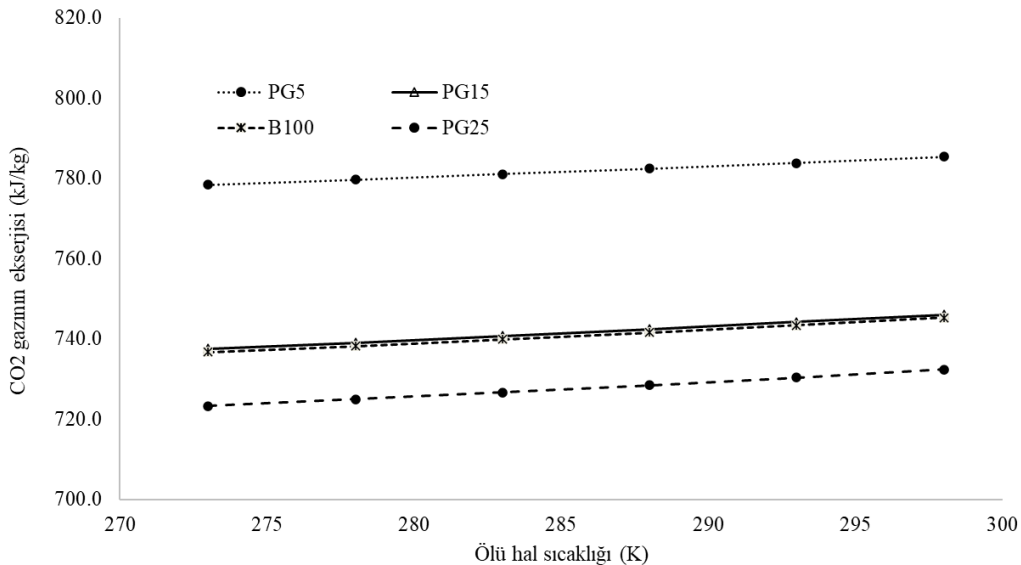
Ftalosiyanın katkısının yanma süreci üzerindeki etkisi, literatürde bildirilen katalitik özellikleri ile açıklanabilir. Metal merkezli ftalosiyanın yapıları, yüksek sıcaklıklarda oksidasyon reaksiyonlarını destekleyebilen redoks özelliklere sahiptir. Bu durum, yakıt-hava karışımının daha etkin yanmasına ve eksik yanma ürünlerinin azalmasına katkı sağlayabilir. Bununla birlikte, bu çalışma deneysel performans ve ekserji analizi üzerine odaklandığından, ayrıntılı kimyasal mekanizma değerlendirmesi çalışma kapsamı dışında tutulmuştur.

Şekil 6'da 2200 dev/dk motor hızında farklı yakıt karışımları için ölü hal sıcaklığının (T_0) değişimine bağlı olarak yanma ürünlerinin su (H₂O) ekserji değerleri verilmiştir. Genel olarak, T_0 'nin 273 K'den 298 K'ye yükselmesiyle birlikte tüm yakıt türlerinde ekserji değerlerinde azalma meydana gelmiştir. PG5 karışımı için ekserji değeri 273 K'de 1131,93 kJ/kg iken, 298 K'de 1112,54 kJ/kg'a düşmüş ve bu azalma yaklaşık %1,7 olmuştur. Benzer şekilde PG15, PG25 ve B100 karışımlarında sırasıyla %1,6, %1,5 ve %1,6 oranlarında düşüşler gözlenmiştir. Yakıt karışımları arasındaki fark incelendiğinde, PG5 karışımının tüm sıcaklıklarda en yüksek ekserji değerlerine sahip olduğu görülmektedir. 273 K'de PG5'in ekserjisi 1131,93 kJ/kg, PG25'in ise 1030,07 kJ/kg olup aradaki fark yaklaşık 101,86 kJ/kg (yaklaşık %9,9) seviyesindedir.

Benzer şekilde 298 K'de bu fark 97,87 kJ/kg'dır. Ayrıca PG15 ve B100 karışımları benzer ekserji değerleri göstermekte olup, 273 K'de sırasıyla 1056,38 ve 1054,83 kJ/kg, bu durum orta düzey biyoyakıt katkısının ekserji açısından saf biyoyakıtta yakın bir performans sergilediğini göstermektedir. H₂O gazı için ölü hal sıcaklığının



Şekil 4. CO egzoz gazı ekserjisinin ölü hal sıcaklığına göre değişimi (Variation of CO exhaust gas exergy with dead-state temperature)



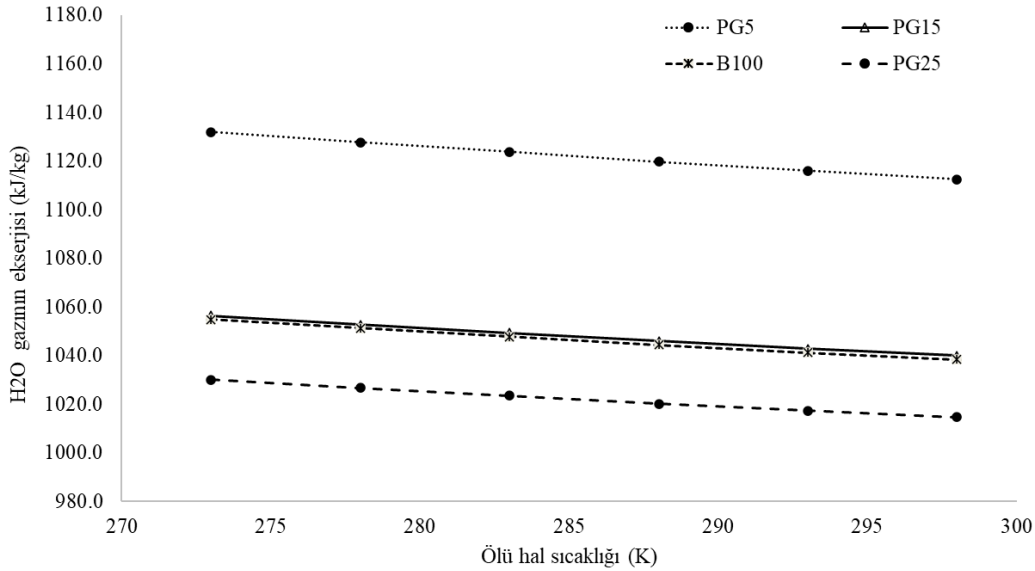
Şekil 5. CO₂ egzoz gazı ekserjisinin ölü hal sıcaklığına göre değişimi (Variation of CO₂ exhaust gas exergy with dead-state temperature)

artmasıyla egzoz ekserjisindeki artış yakıtın fiziksel ekserjisinin artmasından kaynaklanmaktadır.

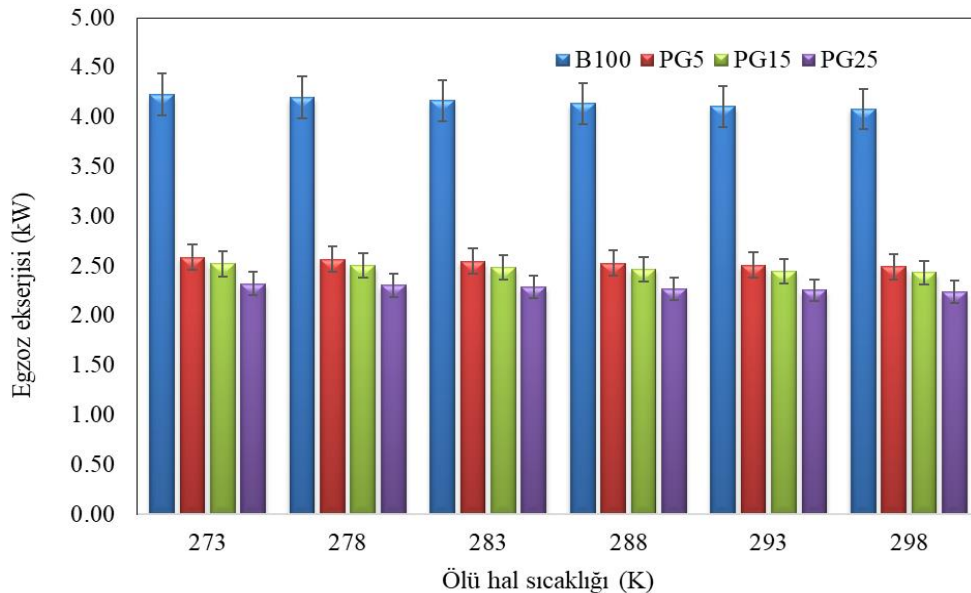
Şekil 7’de, ölü hal sıcaklığının (T_0) değişimine bağlı olarak toplam egzoz ekserji akımı değerleri verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, tüm yakıt türlerinde ölü hal sıcaklığı 273 K’den 298 K’ye yükseldikçe toplam egzoz ekserji akımı azalma eğilimi göstermiştir. Bu azalma oranı yakıt türüne bağlı olarak %3,4 ila %3,9 arasında değişmektedir. PG5 karışımında ekserji akımı 273 K’de 2,59 kW iken 298 K’de 2,49 kW’a düşerek yaklaşık %3,9 oranında azalma göstermiştir. Benzer şekilde PG15, PG25 ve B100 yakıtlarında sırasıyla %3,6, %3,4 ve %3,5 oranlarında düşüşler gözlenmiştir. Yakıt karışımları karşılaştırıldığında, B100 yakıtının tüm ölü hal sıcaklıklarında en yüksek toplam egzoz ekserji akımına sahip olduğu belirlenmiştir. 273 K ölü hal sıcaklığında B100 yakıtının egzoz ekserji akımı 4,23 kW olup, aynı koşulda PG5 karışımına göre yaklaşık 1,64 kat, PG15’e göre 1,68 kat ve PG25’e göre 1,82 kat daha yüksek bulunmuştur. Benzin-biyoyakıt karışımları arasında PG5 > PG15 > PG25 sıralaması gözlenmiştir. 273 K ölü hal sıcaklığında PG5 karışımının toplam

egzoz ekserjisi 2,59 kW iken PG25 için bu değer 2,32 kW’ tır; bu fark yaklaşık %10,4 oranındadır.

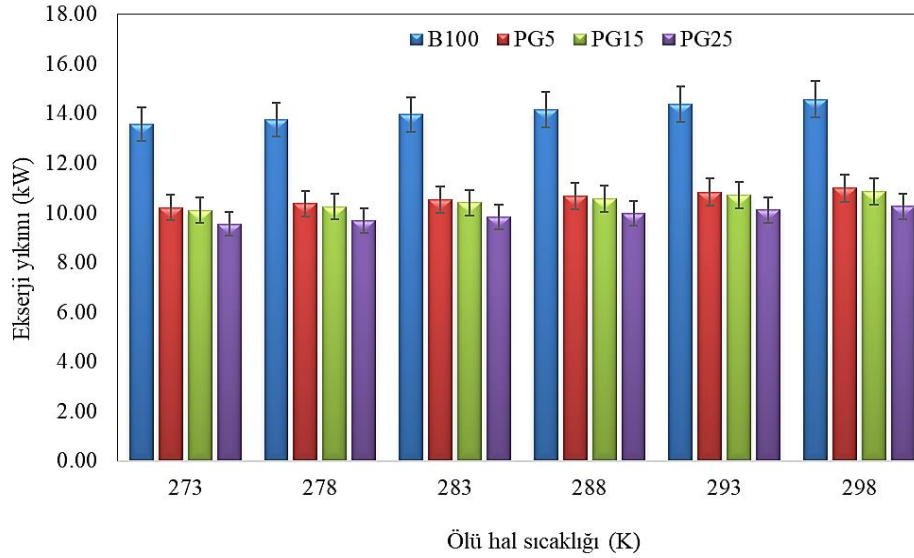
Şekil 8’de, ölü hal sıcaklığının (T_0) artışına bağlı olarak hesaplanan ekserji yıkım oranlarını göstermektedir. Sonuçlar, tüm yakıt türleri için ölü hal sıcaklığının yükselmesiyle birlikte ekserji yıkımının belirgin biçimde arttığını ortaya koymaktadır. Ölü hal sıcaklığı 273 K’den 298 K’ye yükseldiğinde, PG5 yakıtı için ekserji yıkımı 10,22 kW’tan 11,00 kW’a çıkarak yaklaşık %7,6 oranında artış göstermiştir. Benzer şekilde PG15, PG25 ve B100 yakıtlarında sırasıyla %7,5, %7,5 ve %7,4 oranında artışlar kaydedilmiştir. Yakıtlar arasındaki karşılaştırma yapıldığında, B100 yakıtı tüm ölü hal sıcaklıklarında en yüksek ekserji yıkımına sahip olmuştur. 273 K ölü hal sıcaklığında B100’ün ekserji yıkımı 13,57 kW iken, aynı koşulda PG25 için bu değer 9,55 kW olarak hesaplanmıştır. Bu fark yaklaşık %42 düzeyindedir. Karışım yakıtlar arasında ise ekserji yıkımı bakımından PG5 > PG15 > PG25 sıralaması gözlenmiştir. 298 K ölü hal sıcaklığında PG5 ve PG25 arasındaki fark yaklaşık %6,6 düzeyindedir.



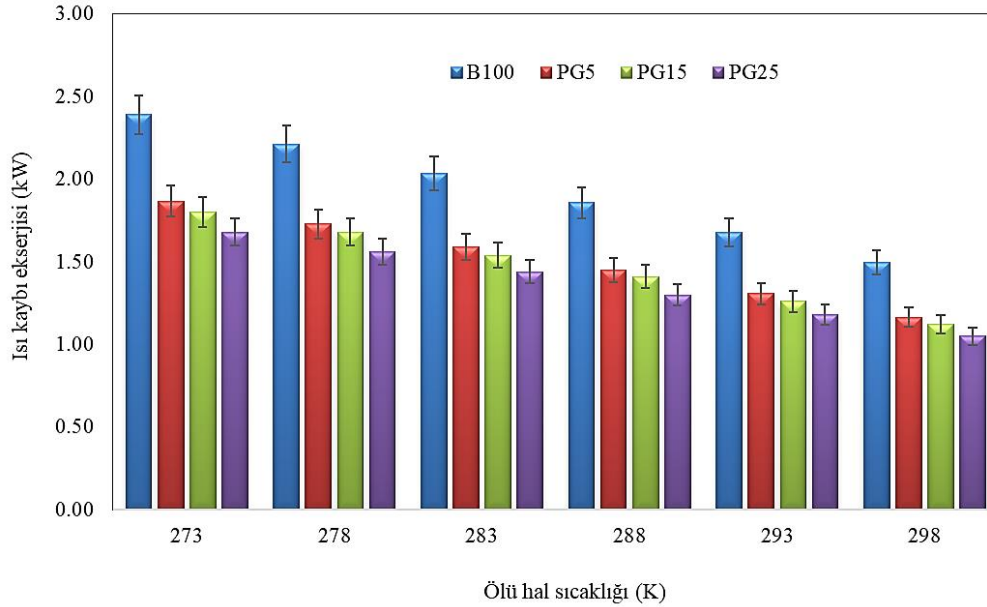
Şekil 6. H₂O’nun egzoz gazı ekserjisinin ölü hal sıcaklığına göre değişimi (Variation of H₂O exhaust gas exergy with dead-state temperature)



Şekil 7. Egzoz ekserjisinin ölü hal sıcaklığına göre değişimi (Variation of exhaust exergy with dead state temperature)



Şekil 8. Ölü hal sıcaklığının ekserji yıkımına etkisi (The effect of dead state temperature on exergy destruction)



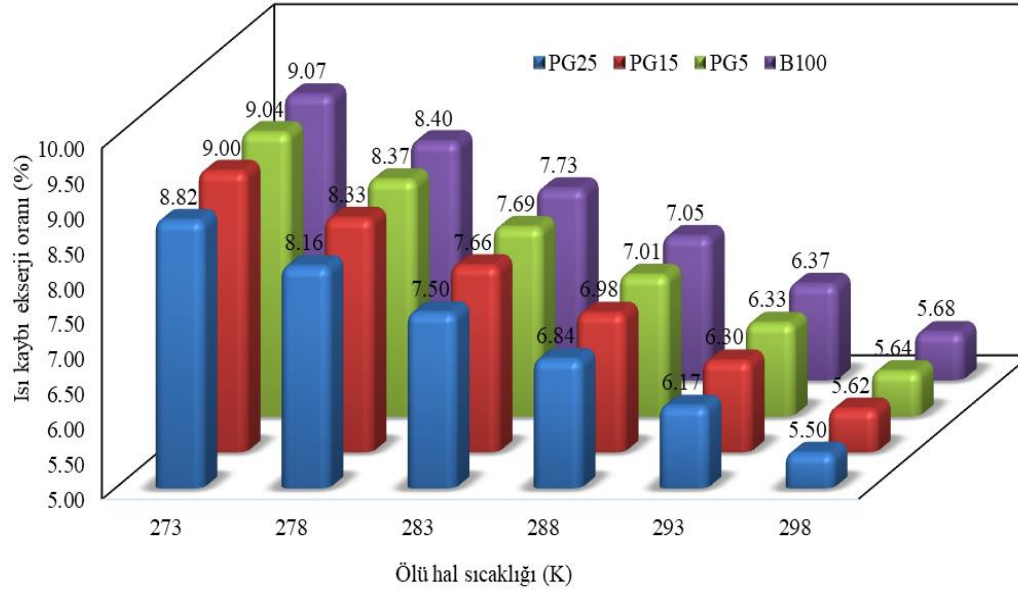
Şekil 9. Ölü hal sıcaklığının ısı kaybı ekserjisine etkisi (Effect of dead state temperature on heat loss exergy)

Genel olarak, ölü hal sıcaklığının 273 K'den 298 K'ye artışı sistemin ekserji yıkımını tüm yakıt türlerinde ortalama %7,5 oranında yükseltmiştir. Yakıt türü açısından bakıldığında, en yüksek ekserji yıkımı B100 yakıtında, en düşük değer ise PG25 karışımında elde edilmiştir.

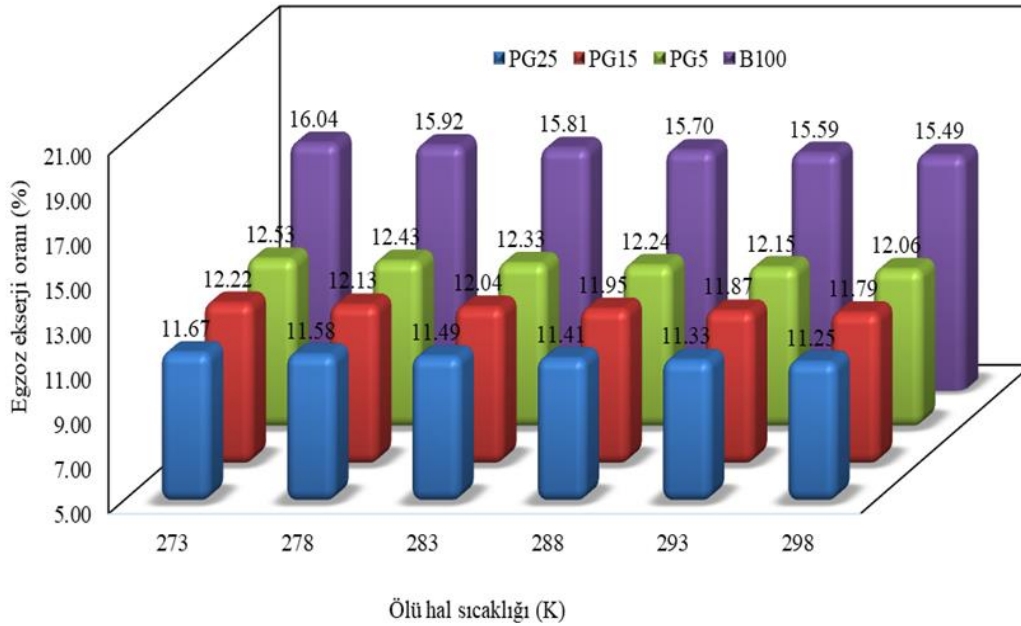
Şekil 9'da ısı kaybı ekserjisinin ölü hal sıcaklığına göre değişimi verilmektedir. İncelenen deneysel bulgulara göre, 2200 dev/dak sabit motor hızında ekserji yıkım oranının hem yakıt tipine hem de ölü hal sıcaklığına (T_0) bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini ortaya koymuştur. Tüm yakıt karışımlarında ortak bir eğilim olarak, ölü hal sıcaklığındaki artış, ekserji yıkım oranını artırmaktadır. B100 yakıtı için 273 K'den 298 K ölü hal sıcaklığına göre hesaplamalar yapıldığında ekserji yıkımı 13,57 kW değerinden 14,58 kW'a artmıştır. Yakıtlar arası karşılaştırmada ise, tüm T_0 değerleri boyunca ekserji yıkım oranları tutarlı bir sıralama sergilemiştir: B100>PG5>PG15>PG25. Bu sıralama, özellikle PG katkı yüzdesi

arttıkça ekserji yıkım oranının azaldığını net bir şekilde göstermektedir. PG25 yakıtının en düşük yıkım oranı, 298 K'de 10,27, B100'e en yüksek yıkım oranı, 298 K'de 14,5) kıyasla önemli ölçüde daha düşük bir ekserji yıkımına sahip olması, PG katkı maddesinin yanma sırasındaki tersinmezlikleri etkili bir şekilde azaltmaktadır. Şekillerde sunulan hata çubuklarının incelendiğinde, tüm yakıt türleri ve referans sıcaklık seviyeleri için belirsizlik aralıklarının nispeten dar olduğunu göstermektedir. Yakıt karışımlarının ortalama değerleri arasındaki farkların genellikle hata aralıkları içinde kesişmemesi, gözlemlenen varyasyonların rastgele ölçüm hatasından ziyade yakıt bileşiminin sistematik etkilerine atfedilmesinin daha olası olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, sonuçlar istatistiksel olarak güvenilir ve analitik olarak tutarlı kabul edilebilir.

Şekil 10'da, farklı yakıt karışımları (PG25, PG15, PG5 ve B100) için, çeşitli ölü hal sıcaklıklarında (273 K'den 298 K'e kadar) ısı kaybı ekserjisinin yakıt ekserjisi içindeki yüzdelik oranı gösterilmektedir.



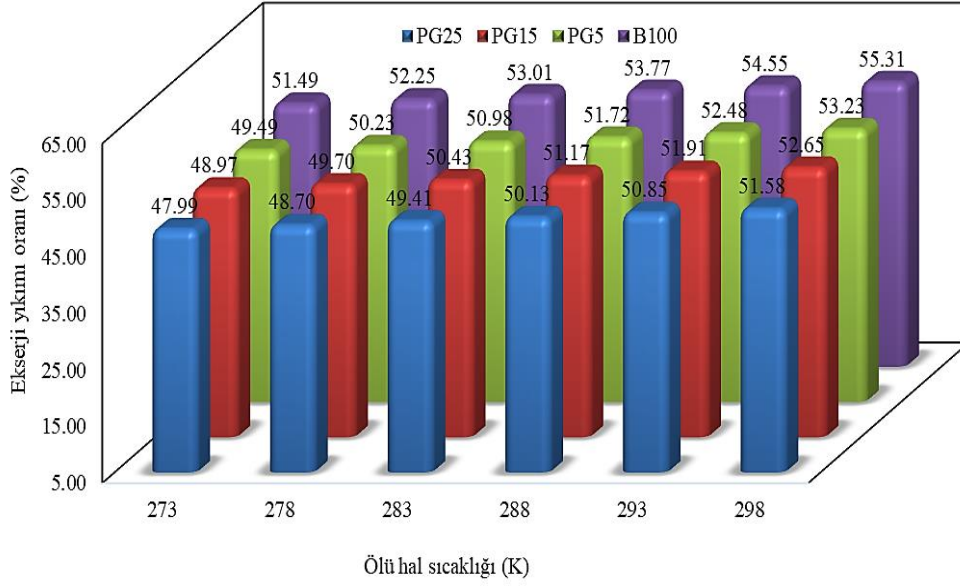
Şekil 10. Isı kaybı ekserjisinin yakıt ekserjisine oranının ölü hal sıcaklığı ile değişimi
(Variation of the ratio of heat-loss exergy to fuel exergy with dead-state temperature)



Şekil 11. Egzoz ekserjisinin yakıt ekserjisine oranının ölü hal sıcaklığı ile değişimi
(The variation of the ratio of exhaust exergy to fuel exergy with dead-state temperature)

Tüm yakıt türlerinde T_0 yükseldikçe egzoz ekserjisinin yakıt ekserjisine oranının düzenli biçimde azaldığı görülmektedir. Yakıt türleri karşılaştırıldığında, PG25 karışımı tüm sıcaklık aralıklarında en düşük ısı kaybı ekserjisi oranını üretmiştir. 273 K'de PG25 için oran %8,82 iken, PG15 (%9,00), PG5 (%9,04) ve B100 (%9,07) daha yüksek değerler sergilemektedir. Benzer eğilim tüm sıcaklık seviyelerinde korunmuş, 298 K'de PG25 %5,50 ile en düşük ekserji kaybına ulaşmıştır. Bu sonuç, yüksek $F_{talosiyani}$ oranının yanma sürecindeki tersinmezlikleri azaltarak egzozla taşınan kullanılabilir enerji payını düşürdüğünü göstermektedir. $PG25 > PG15 > PG5 > B100$ sıralamasına göre katkı oranı azaldıkça ekserji kaybı yüzdesi artmaktadır. Bu durum $F_{talosiyani}$ 'in yanma kalitesini iyileştirici etkisinin katkı oranı ile doğrusal olmasa da tutarlı bir şekilde güçlendiğini göstermektedir.

Şekil 11'de farklı yakıt türlerinin egzoz ekserjisinin toplam yakıt ekserjisi içindeki payını farklı ölü hal sıcaklıklarına göre değişimi verilmektedir. Şekilden gözlemlenen temel eğilim, sıcaklık arttıkça tüm yakıt türlerinde egzoz ekserjisinin yakıt ekserjisine oranının kademeli olarak azaldığıdır. PG25 yakıtında bu oran 273 K'de %11,67 iken 298 K'de %11,25'e düşmektedir. Benzer bir şekilde, PG15 ve PG5 yakıtlarında da %12 civarından başlayan oranlar sıcaklığın artmasıyla sırasıyla %11,79 ve %12,06 seviyelerine inmektedir. B100 yakıtında ise egzoz ekserjisinin yakıt ekserjisi içindeki oranı diğer yakıtlara kıyasla belirgin şekilde yüksektir (%16,04–%15,49 aralığında). Bu durum, B100'ün yanma sürecinde daha fazla termodinamik kayba yol açtığını ve dolayısıyla egzozda daha yüksek ekserji miktarı bıraktığını göstermektedir. Genel olarak, elde edilen verilere göre, daha yüksek $F_{talosiyani}$ oranına sahip yakıtların egzoz



Şekil 12. Ekserji yıkımı ekserjisinin yakıt ekserjisine oranının ölü hal sıcaklığı ile değişimi
(The variation of the ratio of exergy destruction exergy to fuel exergy with dead-state temperature)

ekserjisi oranlarının azaltıldığını ve sıcaklık yükselmesiyle birlikte bu kayıpların kısmen azalma eğiliminde olduğunu göstermektedir. Şekil 12’de egzoz ekserji yıkımının yakıt ekserjisine oranı verilmektedir. Şekil incelendiğinde, farklı biyodizel katkı oranlarına sahip yakıtların yakıt ekserjisi içindeki ekserji yıkım yüzdeleri, sıcaklık artışıyla birlikte düzenli bir şekilde yükselmektedir. PG25, PG15 ve PG5 katkılı yakıtlar ile saf benzin (B100) arasında belirgin bir sıralama gözlemlenmektedir. Yakıtlar karşılaştırıldığında, ekserji yıkım oranlarının tüm sıcaklık seviyelerinde $PG25 < PG15 < PG5 < B100$ sıralamasını izlediği net bir şekilde görülmektedir. 273 K’de PG25’in %47,99 olan ekserji yıkımı, PG15’te %48,97’ye, PG5’te %49,49’a ve B100’de %51,49’a yükselmekte; benzer şekilde 298 K’de değerler sırasıyla %51,58, %52,65, %53,23 ve %55,31 olarak devam etmektedir. Bu durum, Ftalosiyanın katkı oranının artmasıyla ekserji kayıplarının azalma eğiliminde olduğunu göstermektedir. Sıcaklık artışının ekserji tahribatını artırdığı gözlemlenmiştir. Genel olarak, şekilden çıkarılabilecek ana sonuç, ftalosiyanın katkısı arttıkça yakıt ekserjisi içindeki ekserji tahribatının azaldığı fakat ölü hal sıcaklığının artırdığıdır.

Katkı maddesinin ekonomik uygulanabilirliği açısından değerlendirildiğinde, ftalosiyanın türevlerinin düşük dozajlarda kullanılabilmesi önemli bir avantaj sağlamaktadır. Çalışmada elde edilen yakıt tüketimindeki azalma dikkate alındığında, katkı maddesi kullanımının potansiyel olarak maliyet açısından dengelenebileceği öngörülmektedir. Bununla birlikte ayrıntılı maliyet analizleri gelecekteki çalışmalar kapsamında değerlendirilmelidir.

4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, daha önce yakıt üretiminde kullanılmamış olan yeni bir yakıt karışımı Ftalosiyanın-Benzin’den üretilmiş ve içten yanmalı motor performansı üzerindeki etkisini değerlendirmek üzere, Ftalosiyanın katkılı yakıt karışımlarının ekserji performansının, referans noktası olan Ölü Hâl Sıcaklığının (T_0) motor ekserjisine ve yanma sonu gazlarının ekserjisine etkisini incelemek için yapılmıştır. Bu çalışmada, literatürde daha önce içten yanmalı motorlarda kullanımı incelenmemiş olan Ftalosiyanın katkılı benzin karışımlarının (PG) ekserjetik performansı, farklı ölü hal sıcaklıkları (T_0) altında deneysel olarak analiz edilmiştir. Elde edilen veriler ışığında ulaşılan temel sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

Ekserji Yıkımı ve Tersinmezlikler: Ftalosiyanın katkısının yanma sürecindeki tersinmezlikler üzerinde belirgin bir iyileştirici etkisi olduğu saptanmıştır. Özellikle PG25 yakıtı, tüm referans sıcaklıklarda en düşük ekserji yıkım oranını sergilemiştir. 273 K ölü hal sıcaklığında PG25’in ekserji yıkımı 9,55 kW olarak hesaplanırken, saf benzinde (B100) bu değer 13,57 kW olması, katkı maddesinin ekserji yıkımını %42,1 oranında azalttığını kanıtlamaktadır. Bu durum, PG25 karışımının yanma kalitesini artırarak sistemin termodinamik açıdan daha verimli çalışmasına olanak sağladığını göstermektedir.

Ölü Hal Sıcaklığının (T_0) Etkisi: Çevre sıcaklığının 273 K’den 298 K’ye yükselmesi, tüm yakıt kompozisyonlarında N_2 ve O_2 ekserjilerinde düşüşe neden olurken; CO ve CO_2 ekserjilerinde artışa yol açmıştır. PG5 yakıtında N_2 ekserjisi sıcaklık artışıyla birlikte 386,88 kJ/kg’dan 356,74 kJ/kg’a gerilemiştir. Bu değişim, dış çevre koşullarının motorun iş potansiyeli ve emisyon kaynaklı ekserji kayıpları üzerindeki belirleyici rolünü ortaya koymaktadır.

Egzoz Emisyon Ekserjisi: Yanma ürünlerinin ekserji değerleri incelendiğinde, PG25 karışımının çevreye atılan kullanılabilir enerji miktarını (ekserji kaybı) minimize ettiği gözlemlenmiştir. 298 K’de CO_2 ekserjisi saf benzinde 745,25 kJ/kg iken, PG25 kullanımında 732,36 kJ/kg değerine düşmüştür. Toplam egzoz ekserji akımında ise PG25, saf benzine (4,23 kW) kıyasla 2,32 kW (273 K) ile en düşük kaybı vererek çevreyle olan termodinamik dengesizliği en aza indirmiştir.

Genel Değerlendirme: Çalışma sonucunda, benzin içerisindeki Ftalosiyanın konsantrasyonu arttıkça ekserji yıkımının sistematik olarak azaldığı doğrulanmıştır. 298 K referans sıcaklığında PG25’in 10,27 kW’lık ekserji yıkımı, B100’ün 14,58 kW’lık değerine göre çok daha yüksek bir ekserjetik verimliliğe işaret etmektedir.

Özetle; Ftalosiyanın katkılı yeni yakıt formülasyonu, özellikle PG25 oranında, içten yanmalı motorların termodinamik performansını ve yakıtın iş potansiyelini saf benzine oranla önemli ölçüde iyileştirmektedir. Bu bulgu, Ftalosiyanın’in yeni nesil bir yakıt katkı maddesi olarak enerji kayıplarını azaltma potansiyelini bilimsel olarak ortaya koymaktadır.

Pratik Uygulamalar ve Gelecek Çalışmalar: Bu çalışmada elde edilen ekserjetik veriler, Ftalosiyanın katkılı yakıtların sadece teorik bir

araştırma konusu olmadığını, aynı zamanda otomotiv ve enerji sektörlerinde somut uygulama potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymuştur. Çalışmanın pratik önemi ve gelecekteki araştırma yönelimleri şu şekilde özetlenebilir:

Endüstriyel ve Ticari Uygulanabilirlik: Deneyisel sonuçlarda gözlemlenen %42'lik ekserji yıkımı azalması, mevcut içten yanmalı motor teknolojilerinde yakıt ekonomisini iyileştirmek için Ftalosiyanın bazı katkı maddelerinin ticari bir potansiyel taşıdığını göstermektedir. Özellikle yüksek performans gerektiren motorlarda veya emisyon kısıtlamalarının katı olduğu bölgelerde, yanma verimliliğini artıran bu tür katkı maddeleri, motor ömrünü uzatmak ve özgül yakıt tüketimini düşürmek amacıyla kullanılabilir.

Emisyon Kontrolü ve Çevresel Etki: PG25 karışımının egzoz ekserji akımını minimize etmesi, egzoz gazıyla dış ortama atılan "kayıp iş potansiyelinin" azaldığını kanıtlamaktadır. Bu durum, katalitik konvertör yükünün hafifletilmesi ve sera gazı emisyonlarının termodinamik açıdan daha kontrol edilebilir bir seviyeye çekilmesi için pratik bir çözüm sunmaktadır.

Sistem Optimizasyonu: Tasarım mühendisleri için bu veriler; soğutma sistemleri ve egzoz geri kazanım (EGR) sistemlerinin, yakıtın kimyasal ekserjisine göre yeniden kalibre edilmesi gerektiğini göstermektedir. Özellikle farklı çevre sıcaklıklarında (T_o) değişen ekserji karakteristikleri, değişken iklim koşullarında çalışan araçların motor yönetim sistemleri (ECU) için bir optimizasyon parametresi olarak kullanılabilir.

Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler: Bu araştırmanın devamı niteliğinde; Ftalosiyanın katkısının motorun mekanik parçaları üzerindeki uzun vadeli aşınma ve korozyon etkilerinin (tribolojik analiz) incelenmesi planlanmaktadır. Ayrıca, bu katkı maddesinin farklı sıkıştırma oranlarında ve turboşarjlı motorlardaki yanma kinetiği üzerindeki etkilerinin sayısal modelleme (CFD) ile desteklenmesi, literatürdeki boşluğu tam anlamıyla dolduracaktır.

Kaynaklar (References)

- Shokri S., Alizadeh M.S., Avam A. Multi-objective optimization model to design air-cooled heat exchangers using economic and exergy analyses, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 174, 110878, 2026.
- Monforte C.G., Lete A., Marias F., Abrego J., Arauzo J. Energy, exergy and mass balances of a biomass pyrolysis pilot plant, *Energy Conversion and Management*, 353, 121154, 2026.
- HanY., Feng L., Fu Z., Sui J., Feng H., Qian H. Exergy analysis of a solar PV/T heat pump system based on ground-level solar radiation. *Energy*, 341, 139482, 2025.
- Dai Z., Xiang J., Qin S., Zhang H. Study on irreversibility in an ejector with zeotropic mixtures using direct entropy analysis method, *International Journal of Refrigeration*, 183, 108-122, 2026.
- Mamadou A.F.I., Vargas J.V.C., Sanya S.A.O., Pitz D.B., Sanoussi B.R., Idrissou M.O.K., Ordóñez J.C., Systemic thermodynamic optimization and optimal control of irreversible single-effect absorption refrigeration system based on linear programming method, *Applied Thermal Engineering*, 285, 129353, 2026.
- Taniguchi, H., Mouri, T., Nakahara, H., Arai, M. Exergy analysis on combustion and energy conversion processes, *Energy*, 30 (2), 111-117, 2005.
- Song, J., Song, H.H. Analytical approach to the exergy destruction and the simple expansion work potential in the constant internal energy and volume combustion process. *Energies*, 13 (2), 395, 2020.
- Ismail, N., Abdullah, S., Mazlan, A., Mustafa, M. Entropy generation and exergy analysis of premixed fuel-air combustion in micro porous media burner. *Entropy*, 22 (10), 1104, 2020.
- Erol, M., Gülcan, Ö. Energy, exergy, greenhouse gas emission impact and economic analysis of a water-cooled diesel engine running on different proportions of waste cooking oil biodiesel, *International Journal of Automotive Engineering*, 12 (3), 145-158, 2025.
- Baltacıoğlu, E., Arat, A., & Kenanoğlu, A. Exergy and performance analysis of a CI engine fuelled with HCNG gaseous fuel enriched biodiesel. *Journal of Thermal Science and Technology*, 36 (4), 211-223, 2017.
- Rakopoulos, C. D., Rakopoulos, D. C., Kosmadakis, G., Giakoumis, E. G., Kyritsis, D. Exergy analysis in highly hydrogen-enriched methane fueled spark-ignition engine at diverse equivalence ratios. *International Journal of Hydrogen Energy*, 49 (15), 6789-6803, 2024.
- Dogan B., Çelik M., Bayındır C., Erol D. Exergy, exergoeconomic, and sustainability analyses of a diesel engine using biodiesel fuel blends containing nanoparticles., 127278, 2023.
- Venu H, Kiong TS, Soudagar MEM, Razali NM, Ramesh S, Fouad Y, et al. A comprehensive combustion, performance, and environmental analyses of algae biofuel, hydrogen gas, and nano-sized particles (liquid-gas-solid mix) in agricultural CRDI engines. *Int J Hydrogen Energy*, 73, 839-55, 2024.
- Chetia B, Debbarma S, Das B. An experimental investigation of hydrogen-enriched and nanoparticle blended waste cooking biodiesel on diesel engine. *Int J Hydrogen Energy*, 49, 23-37, 2024.
- Yüksel T., İzgi A., Experimental investigation of the effects of nanofluid utilization at different engine speeds, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 39 (1), 17-28, 2024.
- Sürer E., Solmaz H., Yılmaz E., Calam A., İpci, D., Investigation of the effects of carbon nanotube addition to diesel-biodiesel blends on engine performance and exhaust emissions, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University.*, 38 (2), 1055-1064, 2023.
- Norouzi, N., Kavousi, A., Elhami, M. Energy and Exergy Analysis of Internal Combustion Engine under Different Ambient Conditions. *International Journal of Combustion and Cleaner Energy*, 1 (1), 25-34, 2021.
- Ertesvåg, I. S. Exergy calculations based on a fixed standard reference environment vs. the actual ambient conditions: Gas turbine and fuel cell examples. *International Journal of Exergy*, 16 (2), 239-261, 2015.
- Çalışkan, H., Tat, M. E., Hepbaşlı, A. Performance assessment of an internal combustion engine at varying dead (reference) state temperatures. *Applied Thermal Engineering*, 29 (16), 3431-3436, 2009.
- Uçkan, İ., Yakın, A., Behçet, R. Investigation of the effect of dead-state temperature on the performance of boron-added fuels and different fuels used in an internal combustion engine. *Heat Transfer Research*, 55 (12), 19-38, 2024.
- Rosen, M. A., Dincer, I. Effect of varying dead-state properties on energy and exergy analyses of thermal systems. *International Journal of Thermal Sciences*, 43 (2), 121-133, 2004.
- Sezer, İ. Exergetic evaluation of speed and load effects in spark ignition engines. *Oil & Gas Science and Technology*, 67 (3), 389-399, 2012.
- Bhatti, S. S., Verma, S., Tyagi, S. K. Energy and exergy-based performance evaluation of variable compression ratio spark ignition engine based on experimental work. *Thermal Science and Engineering Progress*, 9, 332-339, 2019.
- Luo D., Li L., Chen H., Li X. Zhiguang Bao a.c, Zhenhua Ji., Thermoelectric waste heat recovery in different internal combustion engine vehicles: A comparative analysis of energy, exergy and economic, *Applied Thermal Engineering*, 280 128407, 2025.
- Pozzato, G., Rizzo, D., Onori, S. Mean-value exergy modeling of internal combustion engines: Characterization of feasible operating regions. *J. Dyn. Sys., Meas., Control*, 144 (6), 061009, 2022.
- Catona, P. A., Ghamarian, M., Blatnik, S. A. Exergy destruction during the combustion process as functions of operating and design parameters for a spark-ignition engine. *Energy*, 123, 168-180, 2017.
- Yakın A., Cabir B. Effects of adding phthalocyanine to gasoline fuel on engine performance and exhaust emissions in spark ignition engine. *Heat Transfer Research*, 55-14, 33-46, 2024.
- Kotas, T. J. *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*. Krieger Publishing Company, 1995.
- Dincer, I., Rosen, M. A., *Exergy: energy, environment and sustainable development*, Newnes, 2013.
- Khooabakht G. Akram A., Karimi M., Najafi G., Exergy and Energy Analysis of Combustion of Blended Levels of Biodiesel, Ethanol and Diesel Fuel in a DI Diesel Engine, *Applied Thermal Engineering*, 99, 720-729, 2016.

31. Halis, S., & Doğan, B. Effects of intake air temperature on energy, exergy and sustainability analyses in an RCCI engine fueled with iso-propanol and n-heptane. *Energy*, 283, 129264, 2023.
32. Doğan, B., Özer, S., Erol, D. Exergy, exergoeconomic, and exergoenvironmental evaluations of the use of diesel/fusel oil blends in compression ignition engines. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53, 102475, 2022.
33. Yesilyurt, M.K. The examination of a compression-ignition engine powered by peanut oil biodiesel and diesel fuel in terms of energetic and exergetic performance parameters, *Fuel* 2020, 278, 118319, 2020.