



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli bir motorda n-heptan-tetrahidrofuran karışımlarının yanma, performans ve emisyonlara etkisi

The effect of n-heptane-tetrahydrofuran mixtures on combustion, performance and emissions in a homogeneous charge compression ignition engine

Yazar(lar) (Author(s)): Alper CALAM

ORCID: 0000-0003-4125-2127

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Calam A., “Homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli bir motorda n-heptan-tetrahidrofuran karışımlarının yanma, performans ve emisyonlara etkisi”, *Politeknik Dergisi*, 24(3): 1033-1043, (2021).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.796099

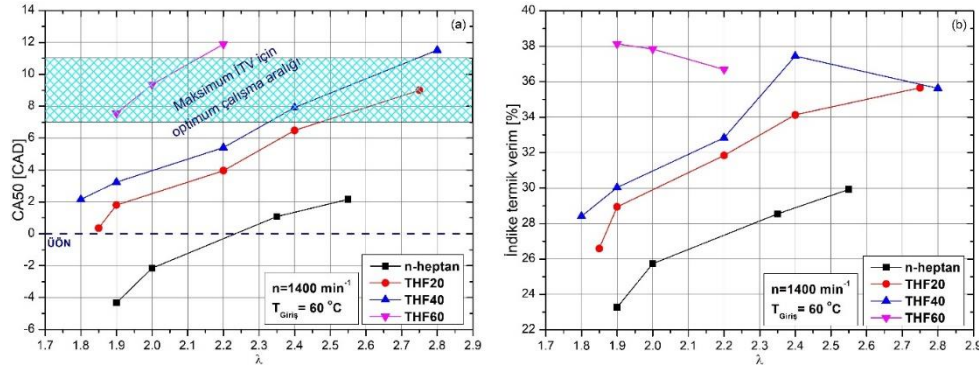
Homojen Dolgulu Sıkıştırma ile Ateşlemeli Bir Motorda N-Heptan-Tetrahidrofuran Karışımlarının Yanma, Performans Ve Emisyonlara Etkisi

The Effect Of N-Heptane-Tetrahydrofuran Mixtures on Combustion, Performance and Emissions in a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Tetrahidrofuran yakıtının HCCI yanması üzerine etkisi incelendi / The effect of tetrahydrofuran on HCCI combustion was examined.
- ❖ Tetrahidrofuran HCCI yanmasını yavaşlattı ve kontrol altına aldı / Tetrahydrofuran slowed down and controlled HCCI combustion
- ❖ En yüksek indike termik verim THF60 yakıtı kullanımında %38.14 olarak kaydedildi / The highest indicated thermal efficiency was recorded as 38.14% by using THF60 fuel.

Grafik Özet (Graphical Abstract)



Şekil. THF'nin verime etkisi / Figure. The effect of THF on efficiency

Amaç (Aim)

Bu çalışmada tetrahidrofuranın HCCI yanması üzerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. / In this study, the effects of tetrahydrofuran on HCCI combustion were investigated experimentally.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Tüm deneyler, dört zamanlı, tek silindirli, Ricardo Hydra HCCI test motoru kullanılarak gerçekleştirildi. / All the experiments were carried out using four stroke, a single cylinder, Ricardo Hydra HCCI test engine.

Özgünlük (Originality)

Tetrahidrofuranın HCCI yanması üzerine etkilerini detaylı bir şekilde inceleyebilmek için referans n-heptan ve üç farklı karışım yakıtı kullanılmıştır. / In order to examine in detail the effects of tetrahydrofuran on HCCI combustion, reference n-heptane and three different fuel mixtures were used.

Bulgular (Findings)

Referans yakıtı göre yüksek oktan sayısına sahip tetrahidrofuran, HCCI yanmasının kontrol altına alınmasını sağlamıştır. / Tetrahydrofuran, which has a higher octane number compared to the reference fuel, has ensured the control of HCCI combustion.

Sonuç (Conclusion)

Tetrahidrofuran, HCCI motorlar için ideal bir alternatif yakıttır. / Tetrahydrofuran is an ideal alternative fuel for HCCI engines.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazarı çalışmasında kullandığı materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan eder. / The author of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Homojen Dolgulu Sıkıştırma ile Ateşlemeli Bir Motorda N-Heptan-Tetrahidrofüran Karışımlarının Yanma, Performans ve Emisyonlara Etkisi

Araştırma Makalesi / Research Article

Alper CALAM*

Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye

(Geliş/Received : 16.09.2020 ; Kabul/Accepted : 12.10.2020 ; Erken Görünüm/Early View : 14.10.2020)

ÖZ

Bu çalışmada tek silindirli, port enjeksiyon sistemine sahip homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli motor kullanılmıştır. Düşük basınçlı port enjektörden referans n-heptan ve tetrahidrofüran-n-heptan karışım yakıtları püskürtülerek, emme ve sıkıştırma zamanı boyunca homojen bir karışım hazırlanmıştır. Silindir içi basınç, ısı dağılımı, yanma başlangıcı, CA50, yanma süresi, indike termik verim, maksimum basınç artış oranı analizi yapılmış ve hidrokarbon ve karbonmonoksit emisyonları belirlenmiştir. Aşırı fakir karışım şartlarında tüm test yakıtları ile silindir içi basınç ve ısı dağılımı azalmıştır. Referans n-heptan yakıtına tetrahidrofüran ilave edilmesi yanma süreçlerinin kontrol edilebilmesini sağlamıştır. En yüksek indike termik verim lambdanın 1.9 olduğu şartlarda TFH60 yakıtı ile %38.14 olarak kaydedilmiştir. N-heptan yakıtına tetrahidrofüran ilavesi yanmayı yavaşlatmıştır. Böylece düşük sıcaklık yanması daha uzun sürede tamamlanmıştır. Aşırı fakir çalışma şartlarında n-heptan-tetrahidrofüran yakıt karışımlarının hidrokarbon ve karbonmonoksit emisyonları referans yakıtına göre artış göstermiştir. En yüksek kirlenici emisyonlar THF60 yakıtı ile elde edilmiştir. Referans yakıtına göre hidrokarbon ve karbonmonoksit ortalama %8.3 ve %54 oranında artmıştır.

Anahtar Kelimeler: HCCI, düşük sıcaklık yanması, yanma, tetrahidrofüran.

The Effect of N-Heptane-Tetrahydrofuran Mixtures on Combustion, Performance and Emissions in a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine

ABSTRACT

In this study, a single cylinder homogeneous charge compression ignition engine with port injection system was used. By spraying reference n-heptane and tetrahydrofuran-n-heptane blends from the low pressure port injector, a homogeneous mixture was prepared during the intake and compression period. In-cylinder pressure, heat release rate, start of combustion, CA50, combustion duration, indicated thermal efficiency, maximum pressure rise rate analysis were done and hydrocarbon and carbon monoxide emissions were determined. In lean mixing conditions, the pressure and heat release rate in the cylinder decreased with all test fuels. The addition of tetrahydrofuran to the reference n-heptane fuel enabled the combustion processes to be controlled. The maximum indicated thermal efficiency was obtained as 38.14 % at 1.9 lambda with THF60 fuel. Addition of tetrahydrofuran to n-heptane fuel slowed down the combustion. Thus, low temperature combustion was completed in a longer period. Under extremely lean operating conditions, hydrocarbon and carbon monoxide emissions of n-heptane-tetrahydrofuran fuel mixtures increased compared to the reference fuel. The highest pollutant emissions have been achieved with THF60 fuel. Compared to the reference fuel, hydrocarbon and carbon monoxide increased by an average of 8.3 % and 54 %.

Keywords: HCCI, low temperature combustion, combustion, tetrahydrofuran.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Endüstriyel tesislerden ve taşıtlardan kaynaklanan kirlenici atıklar temiz su kaynaklarını, toprağı ve atmosferi hızlı bir şekilde kirlenmektedir. Bu nedenle çevre ve insan sağlığı tehdit altındadır [1-5]. Günümüzde endüstriyel atıkların azaltılması ya da bu atıkların geri dönüşüm tesislerinde yeniden değerlendirilmesi ve taşıtlardan kaynaklanan kirlenici emisyonların azaltılması üzerine birçok çalışma yapılmaktadır. Özellikle atmosferin hızlı bir şekilde kirlenmesinin temel kaynağı içten yanmalı motorlardır [6-10].

İçten yanmalı motorlar karayolu taşıtlarında ve deniz taşımacılığında yaygın olarak kullanılmaktadır. Gerek yakıt ekonomisi gerekse de yaydıkları egzoz emisyonları nedeniyle son yıllarda buji ile ateşlemeli (SI) ve sıkıştırma ile ateşlemeli (CI) motorlara alternatif öneriler ortaya koyulmaktadır. Günümüzde araştırmacılar elektrikli araç teknolojisi ve alternatif yanma modelleri üzerine birçok çalışma yapmaktadır [11-15]. Düşük sıcaklık yanmasına sahip homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli (HCCI) motorlar son yıllarda araştırmacıların oldukça ilgisini çeken yeni bir yanma modelidir [16-19]. HCCI motorların en önemli özelliği hava yakıt karışımının SI motorlarda olduğu gibi önceden hazırlanması ve yanmanın CI motorlarda olduğu gibi

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : acalam@gazi.edu.tr

sıkıştırma zamanı sonunda basınç ve sıcaklığın etkisi ile kendiliğinden meydana gelmesidir [20-22]. Bu iki özellik HCCI motorların SI ve CI motorların avantajlarını bir arada bulundurmasını sağlar. HCCI motorlarda yanma çok küçük krank açılarında hızlı bir şekilde meydana geldiği için ısı kayıpları oldukça azdır. Bu nedenle HCCI motorların termik verimi SI motorlardan oldukça yüksektir [23-24]. HCCI motorlarda yanma, homojen karışımın sıkıştırma zamanı sonunda yanma odasının her noktasında aynı anda tutuşmasıyla elde edilir. Bu durum yanma sonu gaz sıcaklıklarının oldukça düşük gerçekleşmesini sağlar. Böylece HCCI motorlardan kaynaklanan kirletici egzoz emisyonları CI motorlara göre oldukça düşük seviyede gerçekleşir [25-26]. Bu özellik nedeniyle HCCI motorlar düşük sıcaklık yanmasına sahip içten yanmalı motorlar olarak anılırlar [27-28].

HCCI motorlar bu çok önemli iki avantajının yanı sıra bazı dezavantajlara da sahiptir. HCCI yanması, önceden karışımı sağlanmış ve yüksek oranda fakir hava yakıt karışımının sıkıştırılarak tutuşturulmasıyla meydana gelir [29-30]. HCCI motorlarda SI ve CI motorlarda olduğu gibi yanma başlangıcını doğrudan kontrol eden bir mekanizma bulunmamaktadır. Bu motorlarda yanma, kimyasal kinetikler ile kontrol edilir [31-32]. Bu nedenle yanma silindir içi sıcaklık ve basınç geçmişinden, yakıt özelliklerinden ve hava yakıt karışımının kompozisyonundan doğrudan etkilenir [33-34]. HCCI motorlarda egzoz gazlarının resirkülasyonu, sıkıştırma oranı ve ön ısıtma ile hava yakıt karışımının sıcaklığı kontrol edilebilir [35-38]. Direkt enjeksiyonlu HCCI motorlarda enjeksiyon zamanlaması, çift yakıt kullanımı ve farklı oktan sayısına sahip alternatif yakıtlar ile hızlı gerçekleşen HCCI yanması kontrol altına alınabilir [39-40]. Turboşarj-süperşarj sistemleriyle, püskürtülen yakıt miktarı ve zamanlaması sayesinde karışımın kompozisyonu kontrol edilebilir [41-42]. Tüm bu parametreler ile HCCI motorlarda yanma başlangıcının zamanlaması kontrol edilebilir.

Bununla birlikte HCCI motorların düşük motor yüklerinde tekleme ve yüksek motor yüklerinde ise vuruntu problemi bulunur [43-44]. Ayrıca yüksek motor hızlarında HCCI yanması için ihtiyaç duyulan şartların hazırlanamaması nedeniyle çalışma aralığı oldukça dardır [45-46]. Çok silindirli HCCI motorlarda silindirler arası çevrimsel farklılıklar meydana gelmektedir [47-48]. HCCI motorların bu zorlukları ile eş zamanlı olarak baş edebilmek için oksijen içerikli alternatif yakıt kullanımı ön plana çıkmaktadır. Ayrıca oksijen içerikli yakıtlar yanmayı iyileştirerek CO ve HC emisyonlarının azaltılmasını sağlar [49-51].

Polat [52], içeriğinde oksijen bulunan, düşük reaktiviteli etanol yakıtının HCCI motorlarda kullanımı üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Yüksek oktan sayısına sahip etanolün reaktivitesini artırmak için dietil eter (DEE) kullanmıştır. Etanol DEE karışım yakıtı kullanımında deney yakıtı içerisindeki DEE oranı arttıkça yanma başlangıcı avansa alınmıştır. Bununla birlikte etanol, yüksek motor yüklerinde vuruntu temayülünü

azaltmaktadır. DEE'nin yüksek volaliteye sahip olması, daha fakir karışım bölgelerinde HCCI yanmasının elde edilmesini sağlamıştır. DEE etanol yakıt karışımları kullanımı ile HCCI yanmasının kontrol edilebildiği bu çalışmada rapor edilmiştir. Bendu vd. [53], etanol yakıtı kullanımında giriş hava sıcaklığının yanma karakteristikleri üzerine etkisini incelemiştir. Giriş sıcaklığının artırılmasının HCCI yanması üzerine önemli etkileri olduğu bu çalışmada ortaya konulmuştur. Giriş sıcaklığının artırılması etanolün yanma süresinin daha küçük krank açılarında gerçekleşmesini sağlamaktadır. Giriş sıcaklığı hava yakıt karışımının reaktivitesini artırmaktadır. Giriş sıcaklığının artırılması ile CA50'nin yeri kontrol edilmektedir. Böylece termik verim de giriş sıcaklığı ile kontrol edilebilir. Giriş sıcaklığının artırılması, etanolün yanma verimliliğini artırmıştır. Buna bağlı olarak CO ve HC emisyonları kayda değer bir oranda azalmıştır. Zhang vd. [54], metanol yakıtlı HCCI yanmasını incelemiştir. Giriş sıcaklığının artırılması yanma süresini kısaltmaktadır. Ayrıca aşırı fakir HCCI yanmasında yanma süresi daha da kısalmaktadır. Bununla birlikte fakir çalışma koşullarında yanma başlangıcı gecikmiştir. HCCI motorlarda lambdanın yanma başlangıcı ve yanma süresi üzerinde önemli etkisi bulunmaktadır. Uyumaz [36], n-heptan isopropanol ve n-heptan n-butanol yakıt karışımlarının HCCI yanması üzerine etkilerini incelemiştir. Her iki yakıt için de giriş sıcaklığının artırılması, yanmanın daha erken krank açılarında başlamasına ve ısı yayılımının da avansa alınmasına neden olmuştur. Aynı giriş havası sıcaklığında karışım yakıtlarındaki isopropanol ve n-butanol oranı arttıkça oktan sayısı artış göstermekte, tutuşma için daha dirençli bir yakıt nedeniyle yanma gecikmeye alınmaktadır. Giriş havası sıcaklığı ve oktan sayısı değişimi ile HCCI yanması kontrol altına alınabilir. Calam [55], 50 oktan sayısına sahip referans yakıtlar ile n-heptan aseton karışımı ile elde ettiği 50 oktan sayısına sahip oksijen katkılı yakıtın HCCI yanması üzerine etkilerini incelemiştir. Ayrıca bu çalışmada farklı sıkıştırma oranları ile referans yakıt-aseton yakıtının çalışma haritaları karşılaştırmalı analiz edilmiştir. Aseton yakıtının aynı oktan sayısındaki referans yakıtı göre daha geniş çalışma haritasına sahip olduğu bu çalışmada ortaya konulmuştur. Ancak asetonun yüksek volalitesi, yüksek sıkıştırma oranında vuruntuya sebep olmuştur. Aseton yakıtı, referans yakıtı göre daha yüksek volaliteye sahiptir. Bunun neticesi olarak farklı lambda değerlerinde yanma süreçleri hassas bir şekilde kontrol edilebilir. Asetonun kolay buharlaşması referans yakıtı göre tüm sıkıştırma oranlarında daha düşük HC ve CO emisyonlarının elde edilmesini sağlamıştır.

Tetrahidrofuran (THF), kimyasal formülünde oksijen bulunduran, suda çözünebilir, renksiz, zehirli olmayan, yapısı eter gruplarına benzeyen, endüstride çözücü olarak kullanılan bir kimyasaldır. THF genellikle Furfural ya da Reppe yöntemi ile üretilebilmektedir. Furfural yönteminde mısır koçanı ya da diğer tarımsal ürünler kullanılabilir. Bu nedenle THF'nin doğal bir enerji

kaynağı olduğu söylenebilir [56-58]. Oksijen içerikli THF'in içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılmasının incelendiği sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Gerçekleştirilen bu çalışmada THF yakıtının HCCI motorlarda yanma ve egzoz emisyonlarına etkisini incelemiştir. N-heptan yakıtına hacimsel olarak %20 (THF20), %40 (THF40) ve %60 (THF60) oranında THF ilave edilmiştir. Deneyler 1400 min⁻¹ motor hızında ve 60 °C emme havası giriş sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Çalışma aralığının analiz edilebilmesi için farklı lambda değerlerinde deneysel çalışma yapılmıştır. Ayrıca ısı dağılımı, silindir içi basınç, yanma başlangıcı (CA10), CA50, yanma süresi, indike termik verim (İTV), basınç artış oranı (MPRR), HC ve CO emisyonlarının sonuçları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

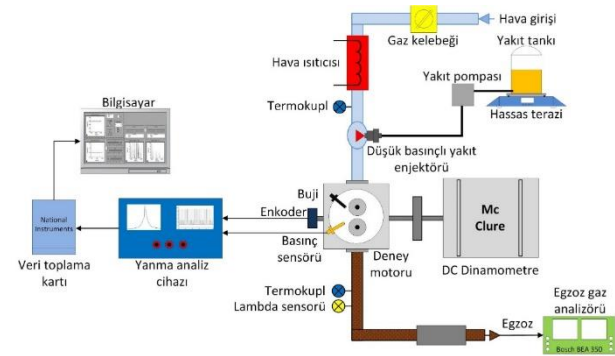
2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Deneysel çalışma; tek silindri, port enjeksiyon sistemine sahip Ricardo Hydra test motorunda sabit motor hızında ve sabit emme havası giriş sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Test motoru öncelikle SI modda çalıştırılmıştır. Ardından HCCI yanmasının elde edilebilmesi için ateşleme sistemi kapatılmıştır. Test motorunun sıkıştırma oranı 5-13 aralığında değiştirilebilmektedir. Deneysel çalışma, gaz kelebeğinin maksimum açık pozisyonunda, 1400 min⁻¹ motor hızında ve motorun 13 sıkıştırma oranında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca test motoru, giriş havasını 160 °C'ye kadar ısıtabilen bir hava ısıtma tertibatı ile donatılmıştır. Bu çalışmada emme havası giriş sıcaklığı 60 °C'de sabit tutulmuştur. Giriş sıcaklığının sabit tutulabilmesi için PID kontrolör kullanılmıştır. Giriş sıcaklığının ölçülmesi için hava ısıtma tertibatından hemen sonra K tipi termokupl kullanılmıştır. Test motorunun orijinal supap lift miktarı hem emme hem de egzoz supabı için 9 mm'dir. HCCI yanmasının kendiliğinden gerçekleşebilmesi için sıkıştırma zamanı sonunda silindir içi gazların sıcaklığının yakıtın kendiliğinden tutuşmasını sağlayacak seviyeye ulaşması gerekir. Bu çalışmada silindir içi gaz sıcaklığının artırılabilmesi için emme ve egzoz supaplarının lift miktarı sırası ile 5.5 mm ve 3.5 mm'ye düşürülmüştür. Test motorunun teknik özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir. Test motoru McClure marka DC bir dinamometre ile yüklenmiştir. DC dinamometre, 6500 min⁻¹ motor hızına kadar 30 kW güç absorbe edebilmektedir. Test düzeneğinin şematik görünümü Şekil 1'de görülmektedir.

Deneysel çalışma referans n-heptan, THF20 (hacimsel olarak %20 THF ve %80 n-heptan), THF40 (hacimsel olarak %40 THF ve %60 n-heptan) ve THF60 (hacimsel olarak %60 THF ve %40 n-heptan) yakıtları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. N-heptan ve THF yakıtlarına ait özellikler Çizelge 2'de görülmektedir.

Çizelge 1. Test motorunun teknik özellikleri (The technical specifications of test engine)

Markası	Ricardo
Silindir sayısı	1
Sıkıştırma oranı	13:1
Enjeksiyon tipi	Port
Kurs boyu (mm)	88.90
Silindir çapı (mm)	80.26
Silindir hacmi (cc)	540
Emme supabı açılması	12° öÜÖN
Emme supabı kapanması	56° sAÖN
Egzoz supabı açılması	56° öAÖN
Egzoz supabı kapanması	12° sÜÖN



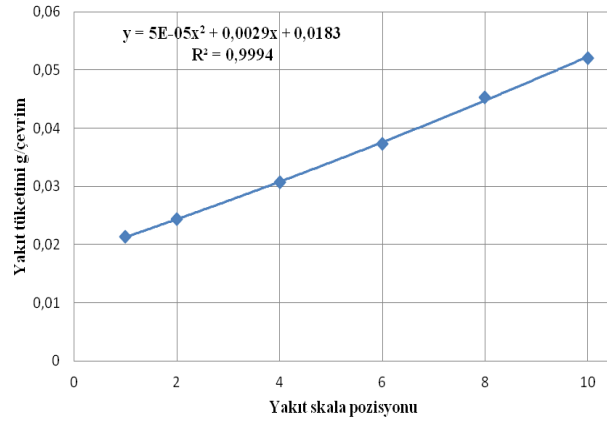
Şekil 1. Test düzeneğinin şematik görünümü (The schematic view of experimental setup)

Çizelge 2. Test yakıtlarının özellikleri (The properties of test fuels) [59-60]

	n-heptan	THF
Kimyasal formül	C ₇ H ₁₆	C ₄ H ₈ O
Oksijen içeriği (%)	0	11.4
Yoğunluk (kg/m ³)	679.5	889.2
Oktan sayısı	0	72.9
Alt ısı değer (kJ/kg)	45500	34880
Kaynama noktası (K)	371	339
Kendiliğinde tutuşma sıcaklığı (K)	477	609.5

Deneyler esnasında test yakıtları, düşük püskürtme basıncına sahip bir enjektör ile emme portuna püskürtülmüştür. Enjeksiyonu yapılacak yakıtın kütle akış hızı, selenoid tipi yakıt enjektörünün sinyal genişliği değiştirilerek belirlenmiştir. Enjektörün sinyal genişliğinin kontrol edilebilmesi için dinamometre kontrol paneli üzerinde yer alan ölçekli bir potansiyometre kullanılmıştır. Yakıt enjeksiyonu 3 bar basınç altında gerçekleştirilmiştir. Enjeksiyonu yapılan yakıt kütesinin belirlenebilmesi için 0.001 g hassasiyetine sahip bir terazi kullanılmıştır. Potansiyometre üzerindeki skala kullanılarak enjeksiyonu yapılan yakıtın doğrusal bir denklemde gerçekleşebilmesi için kalibrasyon prosedürü uygulanmıştır. Bunun için potansiyometre üzerinde yer alan ve 100 eşit parçaya bölünmüş skala kullanılmıştır. Skalada artan büyüklük, daha fazla yakıt enjeksiyonu

anlamına gelmektedir. Enjeksiyonu yapılan her test yakıtı, potansiyometre skalasının 10, 20, 40, 60, 80 ve 100 pozisyonlarında ve 2 dakika süreyle ölçülmüştür. Bu şartlarda her test yakıtı için 0.99'un üzerinde doğruluk ile yakıt enjeksiyon karakteristik denklemleri elde edilmiştir. n-heptan yakıtı için elde edilen enjeksiyon karakteristiği Şekil 2'de görülmektedir. Bu denklemlerde, test esnasında kaydedilen potansiyometre değerleri kullanılarak yakıt tüketimi belirlenmiştir.



Şekil 2. Yakıt tüketiminin belirlenmesinde kullanılan enjeksiyon karakteristiği (The injection characteristic which is used for determine the fuel consumption)

Egzoz emisyonlarının belirlenebilmesi için Bosch BEA350 egzoz gaz analizörü kullanılmıştır. Lambda, egzoz gaz analizörü kullanılarak belirlenmiştir. Egzoz gaz analizörünün teknik özellikleri Çizelge 3'de görülmektedir.

Çizelge 3. Bosch BEA350 egzoz gaz analizörü teknik özellikleri (The specifications of Bosch BEA350 exhaust gas analyzer)

	Aralık	Doğruluk
O₂ (%)	0-22	0.01
NO_x (ppm)	0-5000	1
CO (%)	0-10	0.001
HC (ppm)	0-9999	1
Lambda	0.5-9.9999	0.001

Silindir içi basıncın ölçümü için Kistler 6121 piezoelektrik sensör kullanılmıştır. Basınç sinyalleri bir amfikatör kullanılarak yükseltilmiştir. Analog sinyallerin dijital sinyallere dönüşümü için NI USB 6259 veri toplama kartı kullanılmıştır. Pistonun silindir içerisindeki pozisyonunun belirlenebilmesi için krank mili üzerine 1000 palslik bir enkoder bağlanmıştır. Bu nedenle 0.36 °CAD hassasiyetinde silindir içi basınç toplanmıştır. Veri toplama kartı, enkoder ve silindir içi basınç sensöründen topladığı sinyalleri NI Signal Express 2015 programı kurulu olan bir bilgisayar ortamına aktarmış ve çevrimsel farklılıkların belirlenebilmesi için 50 ardışık çevrime ait datalar kaydedilmiştir. Verilerin filtrelenebilmesi ve termodinamik analiz için MATLAB'da yazılan bir kod kullanılmıştır. Isı dağılımı termodinamiğin birinci

yasasına göre belirlenmiştir. Silindir, kapalı bir hacim olarak düşünülmüş (silindir kaçakları göz ardı edilerek) ve ısı dağılımı Eş. 1 ile hesaplanmıştır.

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{n}{n-1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{n-1} V \frac{dP}{d\theta} + \frac{dQ_{isi}}{d\theta} \quad (1)$$

Burada Q ısı salınımıdır. Q_{isi} silindir duvarından soğutma sıvısına geçen ısı kayıplarıdır. P silindir basıncıdır ve n politropik indekstir. Krank açısına bağlı ısı kayıplarının $\frac{dQ_{isi}}{d\theta}$ hesaplanması için Eş. 2 ile hesaplanmıştır.

$$\frac{dQ_{isi}}{d\theta} = \frac{1}{6 \times N} \times h_g \times A \times (T_g - T_w) \quad (2)$$

Politropik indeks belirlenmesi için Eş. 3 kullanılmıştır.

$$n = - \frac{V \times dP}{P \times dV} \quad (3)$$

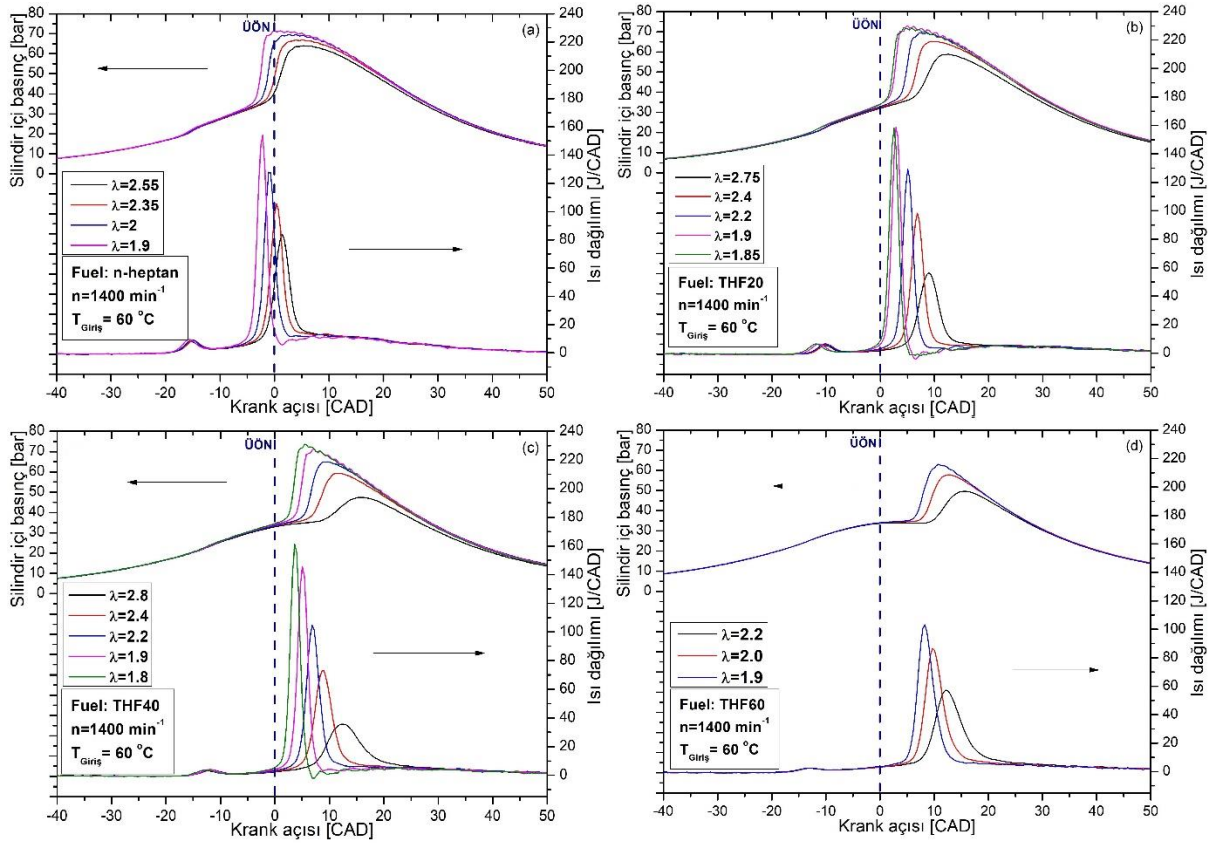
Isı transfer katsayısı, Eş. 4 ve Eş. 5'de görülen ve Chang ve arkadaşları tarafından modifiye edilen Woschni modeli ile hesaplandı.

$$h_g = \alpha_{scaling} \times L_s^{0.2} \times P^{0.8} \times T^{-0.73} \times w^{0.8} \quad (4)$$

$$w = c_1 \times \bar{S}_p \times \frac{c_2}{6} \times \frac{V_s \times T_{ivc}}{P_{ivc} \times V_{ivc}} \times (P - P_{motored}) \quad (5)$$

3. SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME (RESULTS and DISCUSSION)

Şekil 3'de saf n-heptan, THF20, THF40 ve THF60 yakıtları kullanımında, farklı lambda değerlerinde, krank açısına bağlı olarak silindir içi basınç ve ısı dağılımının değişimi görülmektedir. Deneyler 60 °C emme havası giriş sıcaklığında ve sabit 1400 min⁻¹ motor hızında gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırmalı analizin daha kolay yapılabilmesi için Şekil 2'deki silindir içi basınç, ısı dağılımı ve krank açısı eş bölüntü ile gösterilmiştir. Şekil 2 incelendiğinde, tüm test yakıtları kullanımında da HCCI yanmasının bir göstergesi olan iki aşamalı ısı salınımının gerçekleştiği görülmektedir. Tüm test Daha fazla enerji, daha yüksek silindir içi basınç ve daha fazla ısı enerjisinin salınımına neden olmaktadır. Ayrıca en zengin karışım şartlarında maksimum silindir içi basınç daha erken krank açılarında meydana gelir. Bunun sebebi, silindir içerisinde daha fazla yakıt molekülünün bulunması, oksidasyon reaksiyonlarının daha çabuk başlamasını sağlar. Karışımın fakirleşmesi, silindir içerisine daha düşük yakıt enerjisinin sürülmesi anlamına gelir. Böylece maksimum silindir içi basınç azalır. Ayrıca fakir karışım bölgelerinde, özellikle lambdanın maksimum olduğu şartlarda, HCCI yanması gecikmeye alınır.



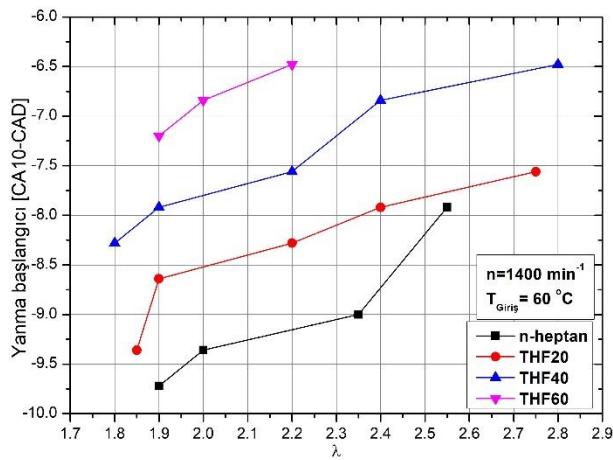
Şekil 3. Tüm test yakıtlarının farklı lambda değerlerinde silindir içi basınç ve ısı dağılımına etkisi (The effect of in-cylinder pressure and heat release rate at different lambda values by using all test fuels)

Düşük enerji yoğunluğu ve ayrıca yanmanın ÜÖN'dan çok sonra gerçekleşmesi yanmanın büyük bölümünün genişleme zamanına kaymasına neden olur. Hacmin genişlemesi silindir içi basıncın hızlı bir şekilde azalmasını sağlar. Şekil 3 (a) incelendiğinde referans n-heptan yakıtı kullanımında lambda'nın 1.9-2.55 aralığında HCCI yanması sağlanmıştır. Özellikle en zengin karışım şartlarında (lambda=1.9) maksimum silindir içi basıncın ÜÖN'dan önce gerçekleştiği görülmektedir. Bu durum çok şiddetli vuruntuya neden olur. Şekil 3 (b-c-d) beraber incelendiğinde tüm lambda değerlerinde, karışım yakıtlarındaki THF oranı arttıkça maksimum silindir içi basıncın ÜÖN'dan sonra elde edildiği görülebilir. Bunun temel sebebi THF'nin oktan sayısıdır. Yüksek oktan sayısına sahip yakıtların HCCI motorlarda kullanılması ile ısı dağılımı eğrilerinde küçük pik olarak görülen düşük sıcaklık yanması (DSY), ikinci pik ve tüm yakıtın yandığı yüksek sıcaklık yanması (YSY) ve bu iki bölge arasında kalan negatif sıcaklık katsayı bölgesi (NSKB) eş zamanlı olarak gecikmeye alınır. Bunun anlamı oktan sayısı, HCCI yanması için gereken şartların daha büyük krank açıları (daha uzun sürede) hazırlanmasına neden olur [60]. Sonuç olarak oktan sayısındaki artış HCCI yanmasının daha geç gerçekleşmesine neden olur. Özellikle Şekil 3 (d)'de görüldüğü gibi THF60 yakıtı kullanımında maksimum silindir içi basıncı ve YSY ÜÖN'dan çok sonra elde edildiği görülmektedir. THF60 kullanımında diğer yakıtlara göre zengin karışım şartlarında HCCI yanması

elde edilmesine rağmen oktan sayısına bağlı olarak yanmanın gecikmeye alınması, genişleyen hacimle beraber daha düşük silindir içi basıncın elde edilmesine neden olmuştur. En yüksek silindir içi basınç, lambda'nın 1.8 olduğu şartlarda THF40 yakıtı kullanımında 73.6 bar olarak kaydedilmiştir. Benzer lambda değerlerinde diğer yakıtların kullanımı ile daha düşük silindir içi basıncın elde edilmesinin sebebi maksimum basıncın elde edildiği krank açısıdır. En yüksek alt ısıl değere sahip olan yakıt referans n-heptandır. Ancak bu yakıt kullanımında yanmanın büyük bir kısmının ÜÖN'dan önce gerçekleşmesi, maksimum silindir içi basıncın daha düşük elde edilmesine neden olmuştur. Referans n-heptan kullanımında, lambda'nın 1.9 olduğu şartlarda maksimum silindir içi basınç 71.6 bar olarak kaydedilmiştir.

Şekil 4'de 60 °C giriş sıcaklığında, 1400 min⁻¹ motor hızında ve farklı lambda değerlerinde gerçekleştirilen çalışmada yanma başlangıcının değişimi görülmektedir. HCCI yanmasında, yanma başlangıcını direkt olarak kontrol eden bir mekanizma bulunmamaktadır. HCCI motorlarda yanma sürecinin bir bütün olarak kontrol edilebilmesi için yanma başlangıcının krank açısı cinsinden yeri önem teşkil etmektedir. Çünkü yanma başlangıcı, diğer yanma süreçlerini de doğrudan etkilemektedir [12]. Tüm test yakıtları kullanımında da lambda'nın artışı yanma başlangıcının gecikmeye alınmasına neden olmuştur. Yanma odasındaki aşırı fakir

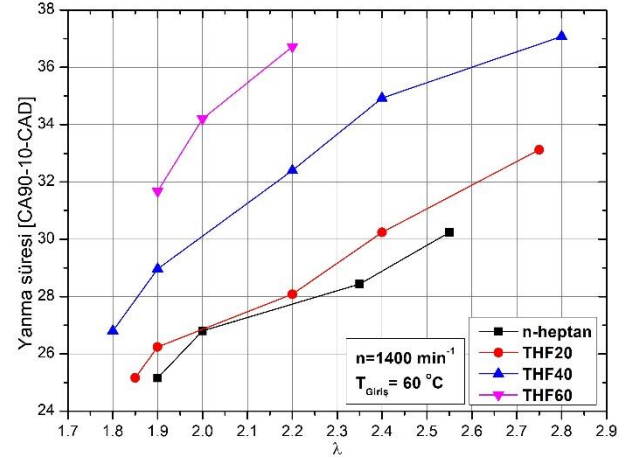
karışım, kendiliğinden gerçekleşen yanma reaksiyonlarını bozmuştur. Bununla birlikte aşırı fakir karışım, yanma sonu gaz sıcaklıklarının da düşük olmasına neden olmaktadır. Yanma, tüm lambda değerlerinde de en erken referans n-heptan yakıtı kullanımında başlamıştır. Referans n-heptanın sıfır olan oktan sayısına bağlı olarak yakıtın tutuşmaya karşı direnç göstermemesi, oksidasyon reaksiyonlarının ÜÖN'dan çok önce başlamasına neden olmuştur. Tüm test yakıtlarının aynı lambda değerine sahip çalışma şartları incelendiğinde (lambda=1.9) karışım yakıtları içerisindeki THF oranı arttıkça yanmanın daha geç krank açıları başlandı görülmektedir. Bu şartlarda referans n-heptan kullanımında yanma ÜÖN'dan 9.72 CAD önce başlamaktadır. THF20, THF40 ve THF60 kullanımında ise yanma sırası ile 8.64 CAD, 7.92 CAD ve 7.2 CAD, ÜÖN'dan önce başlamaktadır.



Şekil 4. Yanma başlangıcının değişimi (The variation of start of combustion)

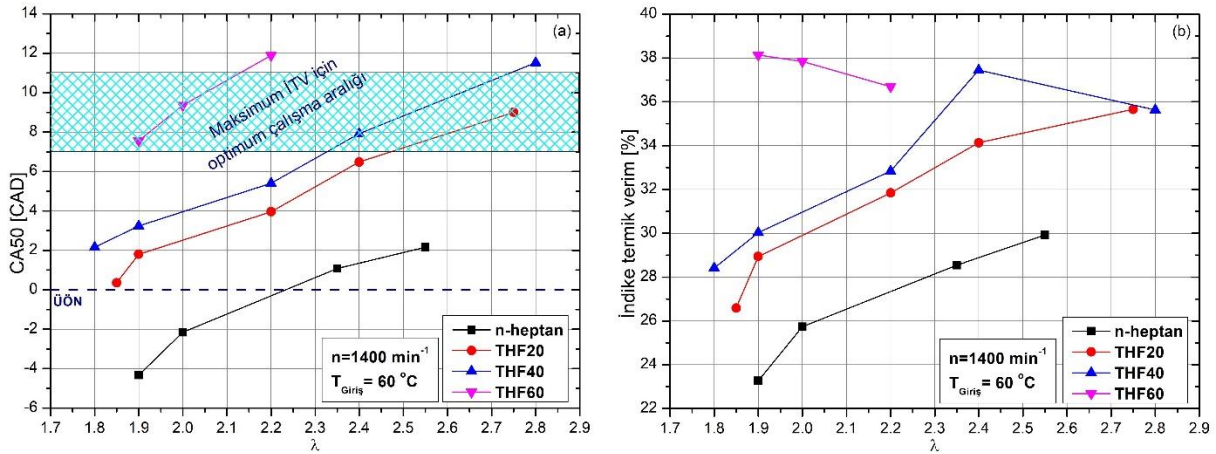
Şekil 5'de 60 °C giriş sıcaklığında, 1400 min⁻¹ motor hızında ve farklı lambda değerlerinde gerçekleştirilen çalışmada yanma süresinin değişimi görülmektedir. HCCI yanması tüm lambda değerlerinde en hızlı n-heptan yakıtı kullanımında tamamlanmıştır. Zengin karışım çalışma şartlarında silindir içi reaksiyon hızının yüksek olması nedeniyle yanma daha küçük krank açıları tamamlanmaktadır. Ancak aşırı fakir karışım şartlarında reaksiyon hızı düşer, yanma sonucu gaz sıcaklıkları azalır ve yanma daha uzun sürede tamamlanır. Ayrıca Şekil 3 incelendiğinde özellikle aşırı fakir karışım şartlarında yanma sürecinin büyük bir kısmının ÜÖN'dan sonra gerçekleştiği görülmektedir. Bu nedenle silindir hacminin artmasıyla silindir içi gaz sıcaklığı azalır ve yanma daha büyük krank açıları tamamlanır. N-heptan yakıtına THF ilavesi ile karışım yakıtlarının oktan sayısı artış gösterir. Oktan sayısının artması, yanmanın daha yavaş gerçekleşmesini sağlar. Böylece yanma süresi ilave olarak daha uzun sürede tamamlanır. Deney sonuçlarının aynı lambda değeri incelendiğinde (lambda=1.9) en uzun yanma süresi THF60 yakıtı kullanımında 31.68 CAD'da tamamlanmıştır. Aynı şartlarda THF40, THF20 ve n-heptan yakıtları kullanımında sırası ile 28.96 CAD, 26.24

CAD ve 25.16 CAD'de yanma tamamlanmıştır. N-heptanın yüksek volalitesi yanmanın daha hızlı gerçekleşmesini sağlamaktadır. N-heptan yakıtına THF ilavesi, hızlı gerçekleşen HCCI yanmasının yavaşlatılarak kontrol altına alınmasını sağlamıştır.



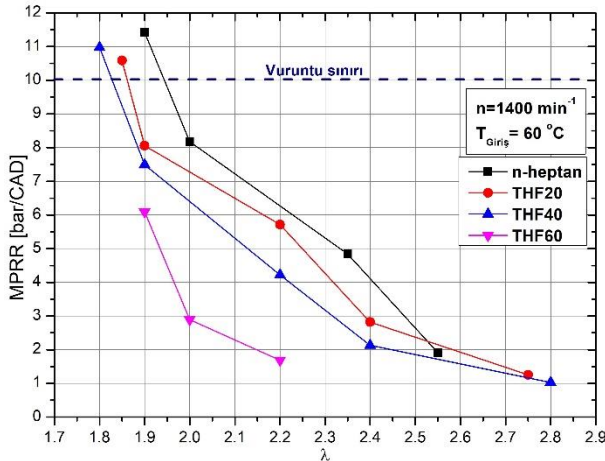
Şekil 5. Yanma süresinin değişimi (The variation of combustion duration)

Şekil 6'da 60 °C giriş sıcaklığında, 1400 min⁻¹ motor hızında ve farklı lambda değerlerinde gerçekleştirilen çalışmada indike termik verim (İTV) ve CA50'nin değişimi görülmektedir. CA50, kümülatif ısı dağılımının %50'sinin gerçekleştiği krank açısını ifade eder ve içten yanmalı motorlarda maksimum İTV'in elde edilebilmesi için CA50'nin ÜÖN'dan 7-11 CAD sonra gerçekleşmesi gerekir [61]. CA50'nin ÜÖN'dan önce gerçekleşmesi negatif işin artmasına neden olur ve İTV düşer. CA50'nin ÜÖN'dan çok sonra, yani genişleme zamanına kaymasıyla silindir hacmi artar ve İTV yeniden azalır. Bu nedenle içten yanmalı motorlarda CA50'nin yeri İTV'ye doğrudan etkilemektedir. Yüksek volaliteye sahip n-heptan yakıtı kullanımında yanmanın büyük bir kısmının ÜÖN'dan önce gerçekleşmesi nedeniyle İTV düşüktür. N-heptan yakıtına THF ilavesi ile yanma yavaşlatılır ve kontrol altına alınır. THF katkılı yakıtların oktan sayısı artış gösterir ve yanma başlangıcı gecikmeye alınır. Buna bağlı olarak CA50 ÜÖN'dan hemen sonra gerçekleştirilir. THF katkılı yakıtların tümünün n-heptan yakıtına göre daha yüksek İTV elde etmesinin temel nedeni budur. Ayrıca THF'nin oksijen içeriği yanmayı iyileştirir ve İTV'nin artmasına katkıda bulunur. En yüksek İTV THF60 yakıtı kullanımında lambda'nın 1.9 olduğu şartlarda %38.14 olarak elde edilmiştir. Aynı şartlar altında İTV, THF40, THF20 ve n-heptan yakıtı kullanımında sırası ile %30.03, %28.94 ve %23.27 olarak kaydedilmiştir. CA50 ve dolayısı ile İTV, lambda değişiminden hassas bir şekilde etkilenmektedir. Bu nedenle her yakıt için maksimum İTV'nin elde edildiği lambda değeri değişkenlik göstermektedir.



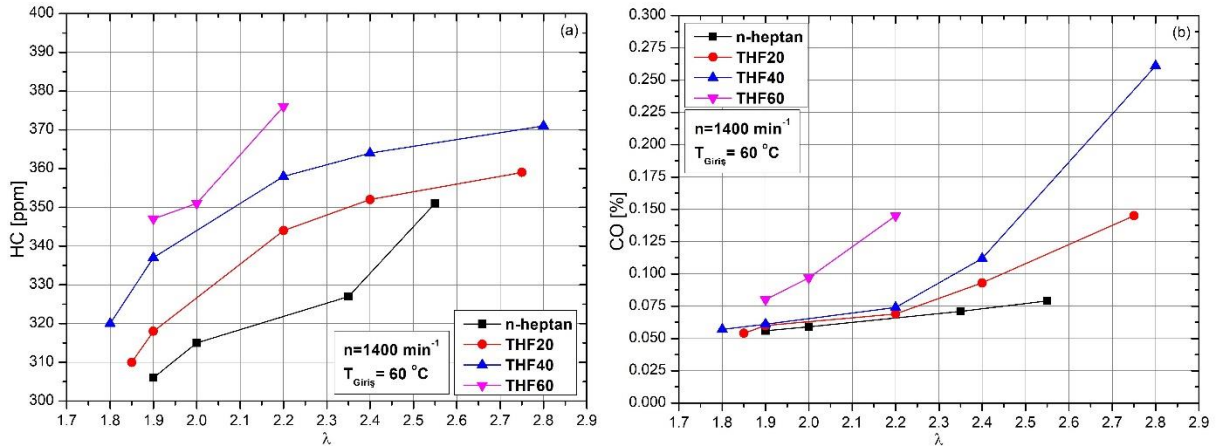
Şekil 6. İTV ve CA50'nin değişimi (The variation of İTV and CA50)

Şekil 7'de 60 °C giriş sıcaklığında, 1400 min⁻¹ motor hızında ve farklı lambda değerlerinde gerçekleştirilen çalışmada maksimum basınç artış oranının (MPRR) değişimi görülmektedir. Özellikle zengin karışimli çalışma şartlarında yanma süresinin kısa olması nedeniyle hızlı gerçekleşen ısı salınımı HCCI motorlarda vuruntuya sebep olmaktadır. Şiddetli vuruntu altında uzun süreli çalışma durumunda motor parçaları çok ciddi zarar görür. İçten yanmalı motorlarda MPRR'nin 10 bar/CAD'ın üzerinde olması vuruntu olarak ifade edilmektedir [61]. HCCI motorlarda vuruntunun azaltılabilmesi için EGR, negatif supap bindirmesi ve yüksek oktan sayılı yakıtların kullanım uygulamaları tercih edilmektedir. EGR ve negatif supap bindirmesi işleminde silindir içerisinde egzoz gazının bırakılması, yanmayı kötüleştirir, yanma süresini uzatır ve MPRR'yi azaltır. Ancak bununla beraber İTV de azalır. Bu nedende HCCI motorlarda vuruntu probleminin ortadan kaldırılması amacıyla yüksek oktan sayısına sahip yakıtlar kullanılabilir. Şekil 7'de n-heptan, THF20 ve THF40 yakıtları kullanımında en zengin çalışma şartlarında vuruntu sınır aşılmıştır. Ancak en yüksek oktan sayısına sahip THF60 yakıtı kullanımında tüm lambda değerlerinde oldukça düşük MPRR elde edilmiştir. THF, vuruntu önleyici katkı maddesi olarak HCCI motorlarda kullanılabilir.



Şekil 7. MPRR'nin değişimi (The variation of MPRR)

Şekil 8'de 60 °C giriş sıcaklığında, 1400 min⁻¹ motor hızında ve farklı lambda değerlerinde gerçekleştirilen çalışmada HC ve CO değişimi görülmektedir. İçten yanmalı motorlardan kaynaklanan HC emisyonları silindir içerisinde çeşitli nedenlerle yakılamayan yakıt moleküllerinden oluşur. Özellikle düşük motor hızlarında silindir içi girdap hareketlerinin düşük olması nedeniyle hava ve yakıtın homojen karışamaması bölgesel zengin ve fakir karışım şartlarına neden olabilir. Bu nedenle HC emisyonları artış gösterir. Ayrıca supapların etrafındaki ve segman yüzeylerindeki oyuklar da HC emisyonlarına sebep olabilir. Bununla birlikte HC emisyonlarının en önemli kaynağı silindir duvarlarına yakın bölgelerdeki ısı kayıplarıdır. Özellikle HCCI motorlarda yanma sonu gaz sıcaklığının düşük olması, silindir duvarlarına yakın bölgelerde hava yakıt karışımının soğutma suyu etkisiyle sıcaklığı daha da düşer. Bu nedenle HC emisyonları artış gösterir. HCCI motorlarda HC emisyonlarını etkileyen en önemli parametreler silindir içi oyuklar ve silindir duvarlarından gerçekleşen ısı kayıplarıdır. Şekil 8 (a)'da HC emisyonlarının değişimi görülmektedir. Karışımın fakirleşmesi ile HC emisyonları artış göstermektedir. Silindir içerisine sürülen enerji miktarındaki azalma, yanma sonu gaz sıcaklıklarının da düşük olmasına neden olur. Bu nedenle oksidasyon reaksiyonları bozulur, yanma tamamlanamaz ve HC emisyonları artış gösterir. En düşük HC emisyonu n-heptan yakıtı kullanımında elde edilmiştir. n-heptan yakıtına THF ilave edilmesi ile HC emisyonları artış göstermektedir. Bunun temel nedeni özellikle fakir karışım çalışma şartlarında yanmanın büyük bir kısmının genişleme zamanına kaymasıdır. HCCI yanmasının en önemli özelliği yanma sonu gaz sıcaklıklarının çok düşük olmasıdır. Böylece sıfır azot oksit emisyonu ile avantaj yaratır. Ancak düşük gaz sıcaklıkları oksidasyon kimyasını bozar ve HC emisyonları artış gösterir. En yüksek HC emisyonu, tüm lambda değerlerinde THF60 yakıtı kullanımında kaydedilmiştir. Şekil 3 (d) incelendiğinde tüm lambda değerlerinde THF60 yakıtı kullanımında yanmanın genişleme zamanında tamamlandığı görülebilir.



Şekil 8. HC ve CO emisyonlarının değişimi (The variation of HC and CO emissions)

Şekil 8 (b)'de CO emisyonlarının değişimi görülmektedir. İçten yanmalı motorlarda CO emisyonu silindir içi oksijen yetersizliği nedeniyle CO'nun CO₂'ye dönüşmemesi neticesinde ortaya çıkan bir emisyon türüdür. Ayrıca yanma sonu gaz sıcaklıkları da CO emisyonlarını doğrudan etkiler. HCCI motorlar aşırı fakir karışım şartlarında çalışabilir. Bu nedenle silindir içerisinde oksijen yetersizliği gibi bir ihtimal bulunmaz. Bununla birlikte aşırı fakir çalışma şartlarında yanma sonu gaz sıcaklıklarının çok düşük olması, oksidasyon reaksiyonlarını bozar ve CO CO₂'ye dönüşmez. Bu nedenle HCCI motorlarda, özellikle aşırı fakir karışım şartlarında yüksek CO salınımı görülür. Şekil 8 (b) incelendiğinde en düşük CO emisyonunun n-heptan yakıtı kullanımı ile elde edildiği görülmektedir. Ancak tüm test yakıtları sonuçları incelendiğinde karışımın fakirleşmesi ile CO emisyonları da artış göstermektedir. Bunun temel nedeni yanma sonu gaz sıcaklıklarıdır. Zengin karışimli çalışma şartlarında gaz sıcaklıkları artış gösterir ve CO CO₂'ye dönüşür. En yüksek CO emisyonu THF60 yakıtı kullanımı ile elde edilmiştir. Yanmanın ÜÖN'dan sonra gerçekleşmesi, silindir hacminin de artışına neden olur. Bu nedenle ısı kayıpları artar, gaz sıcaklıkları azalır ve CO emisyonları artış gösterir.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada 60 °C emme havası giriş sıcaklığında, 1400 min⁻¹ motor hızında ve 4 farklı test yakıtı kullanımında THF'nin HCCI yanması üzerine etkileri incelenmiştir. Deneylerde tek silindirli, port enjeksiyonlu, SI motorundan dönüşümü gerçekleştirilen HCCI motor kullanılmıştır. Deneysel sonuçları karşılaştırmalı analiz edilmiş ve şu sonuçlara ulaşılmıştır:

1. n-heptan yakıtına THF ilave edilmesi yanma başlangıcı ve yanma süreçlerinin kontrol edilebilmesini sağlamıştır.
2. Oktan sayısının HCCI yanması üzerine etkisi büyüktür.
3. n-heptan yakıtına THF ilave edilmesi indike termik verimi artırmıştır. En yüksek indike termik verim THF60

yakıtı kullanımında lambdanın 1.9 olduğu şartlarda %38.14 olarak kaydedildi.

4. Aşırı fakir karışım şartlarında oksidasyon kimyası yavaşlamakta ve yanma gecikmeye alınmaktadır.
5. Aşırı fakir karışım şartları yanma sonu gaz sıcaklıklarının düşük olmasına neden olur. Bu nedenle CO ve HC emisyonları eş zamanlı olarak kötüleşir.
6. THF, doğal enerji kaynaklarından üretilebildiği için içten yanmalı motorlarda alternatif bir yakıt olarak kullanılabilir.
7. THF'nin saf bir şekilde yüksek sıkıştırma oranına sahip HCCI motorlarda kullanılması, HCCI yanması üzerine etkilerinin daha iyi analiz edilmesini sağlayabilir.

5. SİMGELER ve KISALTMALAR (SYMBOLS and ABBREVIATIONS)

AÖN	Alt ölü nokta
CA10	Yanma başlangıcı
CAD	Krank açısı derece
CI	Sıkıştırma ile ateşlemeli motor
CO	Karbonmonoksit
CO ₂	Karbondioksit
DEE	Dietil eter
DSY	Düşük sıcaklık yanması
HC	Hidrokarbon
HCCI	Homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli motor
İTV	İndike termik verim
MPPR	Maksimum basınç artış oranı
NO _x	Azotoksit
NSKB	Negatif sıcaklık katsayı bölgesi
O ₂	Oksijen
öAÖN	Alt ölü noktadan önce
öÜÖN	Üst ölü noktadan önce
saÖN	Alt ölü noktadan sonra
SI	Buji ile ateşlemeli motor
sÜÖN	Üst ölü noktadan sonra
THF	Tetrahidrofuran
THF20	%20 tetrahidrofuran ve %80 n-heptan yakıt karışımı
THF40	%40 tetrahidrofuran ve %60 n-heptan yakıt karışımı

THF60	%60 tetrahidrofuran ve %40 n-heptan yakıt karışımı
ÜÖN	Üst ölü nokta
YSY	Yüksek sıcaklık yanması

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmasında kullandığı materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan eder.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Alper CALAM: Deneyleri yapmış, deney sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Calam, T. T., "Electrochemical Oxidative Determination and Electrochemical Behavior of 4-Nitrophenol Based on an Au Electrode Modified with Electro-polymerized 3, 5-Diamino-1, 2, 4-triazole Film", *Electroanalysis*, 32(1), 149-158, (2020).
- [2] Calam, T. T., "1H-1, 2, 4-triazole-3-thiol modifiye altın elektrot kullanılarak fenolün elektrokimyasal davranışının incelenmesi ve voltametrik tayini", *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, 35(2), (2020).
- [3] Tabanlıgil Calam, T., "Analytical application of the poly (1H-1, 2, 4-triazole-3-thiol) modified gold electrode for high-sensitive voltammetric determination of catechol in tap and lake water samples", *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 99(13), 1298-1312, (2019).
- [4] Perera, F., "Pollution from fossil-fuel combustion is the leading environmental threat to global pediatric health and equity: solutions exist", *International journal of environmental research and public health*, 15(1), 16-17pages, (2018).
- [5] Yeşilyurt, M. K., Doğan, B., & Derviş, E., "Experimental assessment of a CI engine operating with 1-pentanol/diesel fuel blends", *International Journal of Automotive Science and Technology*, 4(2), 70-89, (2020).
- [6] Afsah, S., Laplante, B., & Wheeler, D., "Controlling Industrial Pollution: a new paradigm", *World Bank policy research working paper*, pp. 1672, (1996).
- [7] Yılmaz, E., Solmaz, H., Polat, S., & Altın, M. "Effect of the three-phase diesel emulsion fuels on engine performance and exhaust emissions", *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 28(1), 127-134, (2013).
- [8] Uyumaz, A., Aydoğan, B., Yılmaz, E., Solmaz, H., Aksoy, F., Mutlu, İ., ... & Calam, A., "Experimental investigation on the combustion, performance and exhaust emission characteristics of poppy oil biodiesel-diesel dual fuel combustion in a CI engine", *Fuel*, 280, 118588, (2020).
- [9] Ardebili, S. M. S., Solmaz, H., İpci, D., Calam, A., & Mostafaei, M., "A review on higher alcohol of fusel oil as a renewable fuel for internal combustion engines: Applications, challenges, and global potential", *Fuel*, 279, 118516, (2020).
- [10] Örs, İ., Sayın, B., & Ciniviz, M., "A comparative study of ethanol and methanol addition effects on engine performance, combustion and emissions in the SI engine", *Int J Automotive Sci Technol*, 4(2), 59-69, (2020).
- [11] Solmaz, H., "A comparative study on the usage of fusel oil and reference fuels in an HCCI engine at different compression ratios", *Fuel*, 273, 117775, (2020).
- [12] Polat, S., Solmaz, H., Uyumaz, A., Calam, A., Yılmaz, E., & Serdar Yucesu, H., "An Experimental Research on the Effects of Negative Valve Overlap on Performance and Operating Range in a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine With RON40 and RON60 Fuels", *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 142(5), (2020).
- [13] Kocakulak, T., & Solmaz, H., "Control of pre and post transmission parallel hybrid vehicles with fuzzy logic method and comparison with other power systems", *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35(4), 2269-2286, (2020).
- [14] Solmaz, H., & Kocakulak, T. (2018, December). Buji ile Ateşlemeli Motor Kullanılan Seri Hibrit Elektrikli Bir Aracın Modellenmesi. In Proceedings on International Conference on Technology and Science.
- [15] Kocakulak, T., & Solmaz, H., "HCCI Menzil Arttırıcı Motor Kullanılan Seri Hibrit Bir Aracın Modellenmesi", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım Ve Teknoloji*, 8(2), 279-292, (2020).
- [16] Yılmaz, E., "A Comparative Study on the Usage of RON68 and Naphtha in an HCCI Engine", *International Journal of Automotive Science and Technology*, 4(2), 90-97, (2020).
- [17] Calam, A., Aydoğan, B., & Halis, S., "The comparison of combustion, engine performance and emission characteristics of ethanol, methanol, fusel oil, butanol, isopropanol and naphtha with n-heptane blends on HCCI engine", *Fuel*, 266, 117071, (2020).
- [18] Uyumaz, A., Aydoğan, B., Calam, A., Aksoy, F., & Yılmaz, E., "The effects of diisopropyl ether on combustion, performance, emissions and operating range in a HCCI engine", *Fuel*, 265, 116919, (2020).
- [19] Aydoğan, B., "An experimental examination of the effects of n-hexane and n-heptane fuel blends on combustion, performance and emissions characteristics in a HCCI engine", *Energy*, 192, 116600, (2020).
- [20] Aydoğan, B., "Combustion characteristics, performance and emissions of an acetone/n-heptane fuelled homogenous charge compression ignition (HCCI) engine", *Fuel*, 275, 117840, (2020).
- [21] Parthasarathy, M., Ramkumar, S., Lalvani, J. I. J., Elumalai, P. V., Dhinesh, B., Krishnamoorthy, R., & Thiagarajan, S., "Performance analysis of HCCI engine powered by tamanu methyl ester with various inlet air

- temperature and exhaust gas recirculation ratios”, *Fuel*, 282, 118833, (2020).
- [22] Tanaka, S., Ayala, F., Keck, J. C., & Heywood, J. B., “Two-stage ignition in HCCI combustion and HCCI control by fuels and additives”, *Combustion and flame*, 132(1-2), 219-239, (2003).
- [23] Cinar, C., Uyumaz, A., Solmaz, H., Sahin, F., Polat, S., & Yilmaz, E., “Effects of intake air temperature on combustion, performance and emission characteristics of a HCCI engine fueled with the blends of 20% n-heptane and 80% iso-octane fuels”, *Fuel Processing Technology*, 130, 275-281, (2015).
- [24] Nathan, S. S., Mallikarjuna, J. M., & Ramesh, A., “An experimental study of the biogas–diesel HCCI mode of engine operation”, *Energy Conversion and Management*, 51(7), 1347-1353, (2010).
- [25] Onishi, S., Jo, S. H., Shoda, K., Jo, P. D., & Kato, S., “Active thermo-atmosphere combustion (ATAC)—a new combustion process for internal combustion engines”, *SAE Transactions*, 1851-1860, (1979).
- [26] Hultqvist, A., Christensen, M., Johansson, B., Richter, M., Nygren, J., Hult, J., & Aldén, M., “The HCCI combustion process in a single cycle—high-speed fuel tracer LIF and chemiluminescence imaging”, *SAE Transactions*, 913-927, (2002).
- [27] Agarwal, A. K., Singh, A. P., & Maurya, R. K., “Evolution, challenges and path forward for low temperature combustion engines”, *Progress in energy and combustion science*, 61, 1-56, (2017).
- [28] Saxena, S., & Bedoya, I. D., “Fundamental phenomena affecting low temperature combustion and HCCI engines, high load limits and strategies for extending these limits”, *Progress in Energy and Combustion Science*, 39(5), 457-488, (2013).
- [29] Epping, K., Aceves, S., Bechtold, R., & Dec, J. E., “The potential of HCCI combustion for high efficiency and low emissions”, (No. 2002-01-1923), *SAE Technical Paper* (2002).
- [30] Aceves, S. M., Flowers, D. L., Martinez-Frias, J., Smith, J. R., Dibble, R., Au, M., & Girard, J., “HCCI combustion: analysis and experiments”, *SAE Transactions* (No: 2001-01-2077), (2001).
- [31] Kong, S. C., Marriott, C. D., Reitz, R. D., & Christensen, M., “Modeling and experiments of HCCI engine combustion using detailed chemical kinetics with multidimensional CFD”, *SAE Transactions*, 1007-1018, (2001).
- [32] Calam, A., “Effects of the fusel oil usage in HCCI engine on combustion, performance and emission”, *Fuel*, 262, 116503, (2020).
- [33] Maurya, R. K., & Agarwal, A. K., “Experimental study of combustion and emission characteristics of ethanol fuelled port injected homogeneous charge compression ignition (HCCI) combustion engine”, *Applied Energy*, 88(4), 1169-1180, (2011).
- [34] Aroonsrisopon, T., Sohm, V., Werner, P., Foster, D. E., Morikawa, T., & Iida, M., “An investigation into the effect of fuel composition on HCCI combustion characteristics”, *SAE Transactions*, 1810-1827, (2002).
- [35] Calam, A., Solmaz, H., Yilmaz, E., & İçingür, Y., “Investigation of effect of compression ratio on combustion and exhaust emissions in A HCCI engine”, *Energy*, 168, 1208-1216, (2019).
- [36] Uyumaz, A., “An experimental investigation into combustion and performance characteristics of an HCCI gasoline engine fueled with n-heptane, isopropanol and n-butanol fuel blends at different inlet air temperatures”, *Energy Conversion and Management*, 98, 199-207, (2015).
- [37] Polat, S., Solmaz, H., Yilmaz, E., Calam, A., Uyumaz, A., & Yücesu, H. S., “Mapping of an HCCI engine using negative valve overlap strategy”, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 42(9), 1140-1154, (2020).
- [38] Calam, A., & İçingür, Y., “Giriş havası sıcaklığının hcci motorun yanma ve performansına etkileri”, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 39(1), 69-79, (2019).
- [39] Gan, S., Ng, H. K., & Pang, K. M., “Homogeneous charge compression ignition (HCCI) combustion: implementation and effects on pollutants in direct injection diesel engines”, *Applied Energy*, 88(3), 559-567, (2011).
- [40] Halis, S., Nacak, Ç., Solmaz, H., Yilmaz, E., & Yücesu, H. S., “HCCI Bir Motorda Oktan Sayısının Yanma Karakteristikleri Ve Motor Performansı Üzerine Etkilerinin İncelenmesi”, *Isi Bilimi Ve Tekniği Dergisi/Journal Of Thermal Science & Technology*, 38(2), (2018).
- [41] Dec, J. E., & Yang, Y., “Boosted HCCI for high power without engine knock and with ultra-low NOx emissions—using conventional gasoline”, *SAE International Journal of Engines*, 3(1), 750-767, (2010).
- [42] Singh, A. P., & Agarwal, A. K., “Combustion characteristics of diesel HCCI engine: an experimental investigation using external mixture formation technique”, *Applied Energy*, 99, 116-125, (2012).
- [43] Yelvington, P. E., & Green, W. H., “Prediction of the knock limit and viable operating range for a homogeneous-charge compression-ignition (HCCI) engine (No. 2003-01-1092), *SAE Technical paper*, (2003).
- [44] Olsson, J. O., Tunestål, P., Johansson, B., Fiveland, S., Agama, R., Willi, M., & Assanis, D., “Compression ratio influence on maximum load of a natural gas fueled HCCI engine”, *Sae Transactions*, 442-458, (2002).
- [45] Nishi, M., Kanehara, M., & Iida, N., “Assessment for innovative combustion on HCCI engine by controlling EGR ratio and engine speed”, *Applied Thermal Engineering*, 99, 42-60, (2016).
- [46] Ebrahimi, R., & Desmet, B., “An experimental investigation on engine speed and cyclic dispersion in an HCCI engine”, *Fuel*, 89(8), 2149-2156, (2010).
- [47] Glewen, W. J., Wagner, R. M., Edwards, K. D., & Daw, C. S., “Analysis of cyclic variability in spark-assisted HCCI combustion using a double Wiebe function”, *Proceedings of the Combustion Institute*, 32(2), 2885-2892, (2009).
- [48] Shahbakhti, M., & Koch, C. R., “Characterizing the cyclic variability of ignition timing in a homogeneous charge compression ignition engine fuelled with n-heptane/iso-octane blend fuels”, *International Journal of Engine Research*, 9(5), 361-397, (2008).

- [49] Rezaei, J., Shahbakhti, M., Bahri, B., & Aziz, A. A., "Performance prediction of HCCI engines with oxygenated fuels using artificial neural networks", *Applied Energy*, 138, 460-473, (2015).
- [50] Gharehghani, A., "Load limits of an HCCI engine fueled with natural gas, ethanol, and methanol", *Fuel*, 239, 1001-1014, (2019).
- [51] Taghavifar, H., Nemati, A., & Walther, J. H., "Combustion and exergy analysis of multi-component diesel-DME-methanol blends in HCCI engine", *Energy*, 187, 115951, (2019).
- [52] Polat, S., "An experimental study on combustion, engine performance and exhaust emissions in a HCCI engine fuelled with diethyl ether-ethanol fuel blends", *Fuel Processing Technology*, 143, 140-150, (2016).
- [53] Bendu, H., & Sivalingam, M., "Experimental investigation on the effect of charge temperature on ethanol fueled HCCI combustion engine", *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30(10), 4791-4799, (2016).
- [54] Zhang, C., & Wu, H., "Combustion characteristics and performance of a methanol fueled homogenous charge compression ignition (HCCI) engine", *Journal of the Energy Institute*, 89(3), 346-353, (2016).
- [55] Calam, A., "Study on the combustion characteristics of acetone/n-heptane blend and RON50 reference fuels in an HCCI engine at different compression ratios", *Fuel*, 271, 117646, (2020).
- [56] Kanetaka, J., Asano, T., & Masamune, S., "New process for production of tetrahydrofuran", *Industrial & Engineering Chemistry*, 62(4), 24-32, (1970).
- [57] Nayak, J. N., Aralaguppi, M. I., Kumar Naidu, B. V., & Aminabhavi, T. M., "Thermodynamic properties of water+ tetrahydrofuran and water+ 1, 4-dioxane mixtures at (303.15, 313.15, and 323.15) K", *Journal of Chemical & Engineering Data*, 49(3), 468-474, (2004).
- [58] Long, J., Zhang, Q., Wang, T., Zhang, X., Xu, Y., & Ma, L., "An efficient and economical process for lignin depolymerization in biomass-derived solvent tetrahydrofuran", *Bioresource technology*, 154, 10-17, (2014).
- [59] Hazer, B., "Cationic polymerization of tetrahydrofuran initiated by difunctional initiators. Synthesis of block copolymers", *European polymer journal*, 26(11), 1167-1170, (1990).
- [60] Calam, A., & İçingür, Y., "Hava fazlalık katsayısı ve oktan sayısı değişiminin HCCI yanma karakteristiklerine ve motor performansına etkileri", *Politeknik Dergisi*, 22(3), 607-618, (2019).
- [61] Heywood, J. B. "Internal combustion engines", McGraw-Hill, (1984).