

## An Experimental Investigation of the Effects of Acetone, Tetrahydrofuran and N-heptane Fuel Blends on HCCI Combustion and Engine Performance

 Bilal AYDOĞAN<sup>1,\*</sup> Alper CALAM<sup>2</sup> Ahmet UYUMAZ<sup>3</sup>
<sup>1</sup>Burdur Mehmet Akif Ersoy University, High Vocational School of Technical Sciences, 15100, BURDUR

<sup>2</sup>Gazi University, High Vocational School of Technical Sciences, 06760, ANKARA

<sup>3</sup>Burdur Mehmet Akif Ersoy University, Faculty of Engineering and Architectural, 15030, BURDUR

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Received: 29/05/2019

Revision 18/08/2019

Accepted: 29/08/2019

#### Highlights

- Knocking tendency reduced with acetone and tetrahydrofuran fuel blends.
- In-cylinder pressure and heat release rate reduced with increasing the lambda value
- Operating range of HCCI engine was expanded with the usage of alternative fuel

#### Keywords

 Homogeneous Charged  
 Compression Ignition  
 Engine Performance  
 Alternative Fuel

In this study, a single cylinder, four-stroke gasoline engine was converted to HCCI engine. DC dynamometer was conducted to the test engine. The temperatures were measured with K-type thermocouple. Kistler model 6221 piezoelectric pressure transducer was used to measure in-cylinder pressure. Pressure data was scaled up by Cussons P4110 combustion analysis device and National Instrument USB 6259 data acquisition card converted the data to digital signals. An algorithm arranged in Matlab was used to process raw cylinder pressure data.

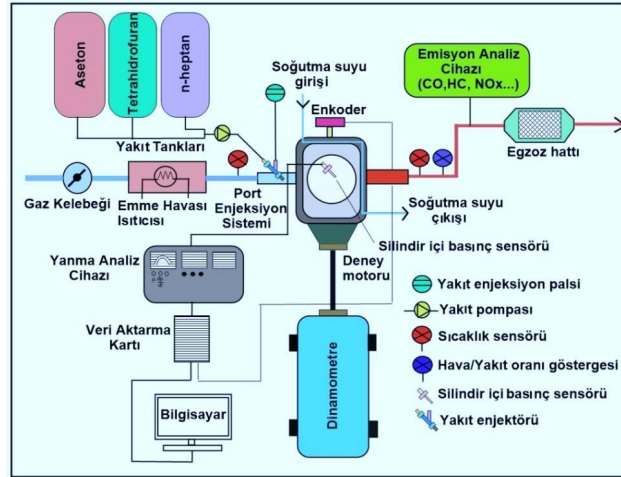


Figure A. The Schematic Diagram of the Experimental Setup

**Purpose:** In this study, the effects of tetrahydrofuran, acetone and n-heptane fuel blends on HCCI combustion, engine performance, CO and HC emissions were investigated experimentally.

**Theory and Methods:** The experiments were performed at 1400 rpm and  $\lambda=1.9 - 2.74$  at full load. Acetone (20%)/n-heptane (80%) and tetrahydrofuran (20%)/n-heptane (80%) fuel blends were used in the experiments. Combustion characteristics and engine performance of the fuel blends were observed.

**Results:** The experimental results showed that, knocking tendency reduced with the usage of A20N80. In-cylinder pressure and heat release rate reduced and combustion was delayed for all test fuels at leaner charge mixtures. Operating range of HCCI engine was expanded with the usage of alternative fuel at misfiring and knocking zones.

**Conclusion:** In this study, the effects of the addition of acetone and tetrahydrofuran into the n-heptane fuel on the combustion and engine performance were investigated. Knocking tendency was reduced with the usage of both acetone and tetrahydrofuran. In-cylinder pressure and heat release rate reduced with increasing the lambda value. Imep values of acetone and tetrahydrofuran fuel blends were higher than n-heptane.

GU J Sci, Part C, 7(3): 700-711 (2019)

Gazi Üniversitesi

**Fen Bilimleri Dergisi**

PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

<http://dergipark.gov.tr/gujsc>

## Aseton, Tetrahidrofuran ve N-heptan Yakıt Karışımlarının Homojen Dolgulu Sıkıştırma İle Ateşlemeli Yanmaya (HCCI) ve Motor Performansına Etkileri Üzerine Deneysel Bir Araştırma

Bilal AYDOĞAN<sup>1,\*</sup> Alper CALAM<sup>2</sup> Ahmet UYUMAZ<sup>3</sup><sup>1</sup>Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, 15100, BURDUR<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, 06760, ANKARA<sup>3</sup>Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, 15030, BURDUR

### Öz

Bu çalışmada tek silindirli, dört zamanlı benzinli bir motor HCCI motora dönüştürülmüştür. HCCI motor 1400 d/d'da,  $\lambda=1.9$  ile  $\lambda=2.74$  lamda değerleri arasında n-heptan, aseton/n-heptan (A20N80) ve tetrahidrofuran/n-heptan (F20N80) yakıt karışımları ile tam yükte çalıştırılmıştır. Aseton ve tetrahidrofuran yakıt ilavelerinin HCCI yanması ve motor performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Test yakıtları ile yapılan deneylerde yanma karakteristikleri, motor performansı incelenmiş, n-heptan yakıtı ile karşılaştırılmıştır. Zengin karışım oranlarında ( $\lambda=1.9$  ve  $\lambda=1.92$ ) n-heptan ve F20N80 yakıtları ile vuruntu eğilimi görülmüştür. Ancak aseton kullanımı ile vuruntu temayülünün azaldığı daha kararlı HCCI yanmasının elde edildiği görülmüştür. Tüm test yakıtları için karışım fakirleştikçe silindir basıncı ve ısı dağılımı azalmıştır. Aynı zamanda karışım fakirleştikçe yanmanın rötara alındığı, HC emisyonlarının azaldığı görülmüştür. Sonuçta HCCI yanmasının farklı alternatif yakıt kullanımı ile daha kararlı hale getirilebileceği ve çalışma aralığının vuruntu ve ateşlenememe bölgesinde genişletilebileceği görülmüştür.

### Makale Bilgisi

Başvuru: 29/05/2019

Düzeltilme: 18/08/2019

Kabul: 29/08/2019

### Anahtar Kelimeler

Homojen Dolgulu  
Sıkıştırma ile Ateşlemeli  
Yanma  
Motor Performansı  
Alternatif Yakıt

### Keywords

Homogeneous Charged  
Compression Ignition  
Engine Performance  
Alternative Fuel

## An Experimental Investigation of the Effects of Acetone, Tetrahydrofuran and N-heptane Fuel Blends on HCCI Combustion and Engine Performance

### Abstract

In the current study, a single cylinder, four stroke gasoline engine was converted to HCCI engine. HCCI engine was run at 1400 rpm, between  $\lambda=1.9$  and  $\lambda=2.74$  lambda values with n-heptane, acetone/n-heptane (A20N80) and tetrahydrofuran/n-heptane (F20N80) fuel blends at full load. The effects of tetrahydrofuran and acetone fuel addition on combustion characteristics and engine performance were researched. Combustion characteristics and engine performance were observed and compared with n-heptane. Knocking was seen with n-heptane and F20N80 with richer mixtures ( $\lambda=1.9$  and  $\lambda=1.92$ ). But, knocking tendency reduced with the usage of A20N80 and HCCI engine was stably run. In-cylinder pressure and heat release rate decreased with leaner charge mixture for all test fuels. In addition, combustion was delayed and HC was reduced with leaner charge mixtures. As a result, it was seen that stable HCCI combustion could be achieved with alternative fuel and operating range of HCCI engine can be expanded at misfiring and knocking zones.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Petrol esaslı yakıtlar dünyada ulaştırma sektörü gibi birçok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Teknolojinin gelişmesi ile birlikte fosil kökenli yakıtların kullanılması ve tüketilmesi bununla birlikte, çevreye ve atmosfere verilen zarar gün geçtikçe artmaktadır [1-3]. Konvansiyonel yanma türlerinde yüksek yüklerde ve zengin karışım oranlarında yanma sonu gaz sıcaklığı artmakta azot oksit oluşumu görülebilmektedir [2-7]. Aynı zamanda yanma odasında heterojen karışım sonucu lokal zengin karışım bölgeleri oluşmakta HC ve is emisyonları açığa çıkmaktadır. Bu noktada araştırmacılar Kontrollü Kendiliğinden Ateşleme (CAI), Reaktif Kontrollü Sıkıştırma ile Ateşleme (RCCI) ve Homojen Dolgulu Sıkıştırma ile Ateşleme gibi düşük sıcaklık yanmasına bağlı yanma modları üzerinde çalışmaktadırlar [2-12]. Düşük sıcaklık yanmasında ateşleme üzerinde harici bir kontrol olmadığından yanma odasının genelinde lokal zengin karışım bölgeleri oluşmadan fakir karışımın tamamının eş zamanlı olarak yanması gerçekleşmektedir. Ancak kendiliğinden tutuşmanın başlayabilmesi için homojen karışımın sıcaklığının kendiliğinden tutuşma sıcaklığına ulaşana kadar artırılması gerekmektedir. Kendiliğinden yanma reaksiyonları sıkıştırma kursu sonundaki termodinamik şartlara göre değişmekte, yanma kimyasal kinetikler tarafından kontrol edilmektedir. Yüksek motor yüklerinde ani ve hızlı basınç artış oranına bağlı olarak vuruntu görülebilmekte, HCCI motorun çalışma aralığı daralmaktadır. Bu noktada yakıtın fiziksel özellikleri yanma seyrini direkt etkilemekte, yanma başlangıcı kontrol edilebilmektedir. Özellikle oktan sayısı yüksek yakıtlar ile yanma fazı kontrol edilerek istenmeyen vuruntu oluşumu önlenmektedir [9-18]. Türkcan ve ark. [19] enjeksiyon parametrelerinin etanol/benzin, metanol/benzin yakıt karışımları ile çalışan HCCI bir motorda etkilerini incelemişlerdir. Alkol/benzin karışımları ile birinci enjeksiyon zamanlaması avansa alındığında maksimum basınç artış oranının arttığını görmüşlerdir. Hasan ve ark. [20] n-heptan ile çalışan HCCI bir motorda motor performans parametrelerini ve yanma karakteristiklerini incelemişlerdir. Motor devri azaltıldığında yanmanın avansa alındığını, yanma süresinin kısaldığını belirtmişlerdir. Uyumaz [21] bütanol/izopropanol ve n-heptan yakıt karışımları (B20,B30,B40, P20, P30,P40) ile çalışan HCCI bir motorda emme havası giriş sıcaklığının etkilerini deneysel olarak araştırmıştır. Test yakıtları ile emme giriş sıcaklığı arttıkça yanmanın avansa alındığını görmüştür. İzopropanolün bütanole göre vuruntuya daha fazla direnç gösterdiğini belirtmiştir. Çınar ve ark. [22] %20 n-heptan %80 izooktan yakıt karışımı (RON80) ile çalışan HCCI bir motorda emme havası giriş sıcaklığının performans ve yanma özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. 70°C emme havası giriş sıcaklığında motor torkunun  $\lambda=0.6$ 'da  $\lambda=0.7$ 'ye göre %3.1 azaldığını görmüşlerdir. Özgül yakıt tüketimi ve NO<sub>x</sub> emisyonlarının 100°C ve 120°C sıcaklıklarda arttığını belirtmişlerdir. Çınar ve ark. [23] başka çalışmada supap kalkma miktarının HCCI yanması ve çalışma aralığı üzerindeki etkilerini araştırmıştır. HCCI çalışma aralığının düşük supap kalkma miktarına sahip kamlar ile vuruntu ve ateşlenememe bölgelerinde genişletilebileceği görülmüştür. Deney motorunun yüksek emme havası giriş sıcaklıklarında daha fakir karışımlarla HCCI yanma modunda çalıştığını görmüşlerdir. He ve ark. [24] n-bütanolün HCCI motorda yanma ve emisyon karakteristikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Motor devri arttığında kendiliğinden tutuşma başlangıcının avansa, yanma süresinin rötara alındığını ifade etmişlerdir. Mack ve ark. [25] HCCI bir motorda bütanol izomer yanmasını geniş hava/yakıt oranı ve emme havası basıncı aralığında incelemişlerdir. N-bütanolün daha kararlı bir yanma sergilediğini görmüşlerdir. Calam ve ark. [26] sıkıştırma oranının HCCI yanması ve performans üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. RON40 test yakıtı ile 12:1 sıkıştırma oranında termik verimi % 38.2 hesaplamışlardır. En geniş çalışma bölgesini 10:1 sıkıştırma oranında RON20 test yakıtı ile elde etmişlerdir.

Bu çalışmanın amacı tetrahidrofur, aseton ve n-heptan yakıt karışımlarının (F20N80, A20N80, n-heptan) HCCI yanması, motor performansı, CO ve HC emisyonları üzerindeki etkilerini deneysel olarak araştırmaktır. HCCI motora dönüşümü yapılan tek silindir benzinli motor tam yükte, 1400 d/d'da sabit 60°C emme havası giriş sıcaklığında çalıştırılmış, test yakıtlarının silindir basıncı, ısı dağılımı, yanma aşamaları, termik verim, indike ortalama efektif basınç, vuruntu yoğunluğu üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

Deneyler Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü İçten Yanmalı Motorlar Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Tek silindirli, dört zamanlı, buji ile ateşlemeli bir motor HCCI motora dönüştürülmüştür. Deney motorunun orijinal supap kalkma miktarı emme ve egzoz kamları için 9 mm'dir.

Deney motorunun HCCI modda çalıştırılması için kam mekanizması yeniden tasarlanmış ve emme supabı kalkma miktarı 5.5mm, egzoz supabı kalkma miktarı 3.5 mm olan kamlar adapte edilmiştir. Deneylere başlanmadan, deney motoru önce buji ile ateşleme modunda çalıştırılmış ve motor çalışma sıcaklığına getirilmiştir. Deneyler sabit soğutucu ve motor yağ sıcaklıklarında gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinin şematik görünümü Şekil 1’de verilmektedir. Deney motorunun yüklenebilmesi için 6500 d/d’da 30 kW güç absorbe edebilen DC dinamometreye bağlanmıştır. Deney motorunun teknik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. HCCI yanmasında yakıt özelliklerinin incelenmesi için yapılan çalışmada üç farklı test yakıtı kullanılmıştır. Hacimsel olarak karıştırılan %20 aseton-%80 n-heptan (A20N80), %20 tetrahidrofuran-%80 n-heptan (F20N80) ve saf n-heptan yakıtları kullanılmıştır. Deneyler test yakıtları ile 1400 d/d’da,  $\lambda=1.90$  ile  $\lambda=2.74$  lamda değerleri arasında, sabit emme havası giriş sıcaklığında (60°C) ve tam yükte HCCI yanma modunda gerçekleştirilmiştir. Aseton ve tetrahidrofuran yakıtlarının HCCI yanması üzerindeki etkileri araştırılmış, n-heptan yakıtı ile karşılaştırılmıştır. Deney yakıtlarının özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 1.** Deney motorunun teknik özellikleri

| Model                | Ricardo Hydra                            |
|----------------------|--|
| Silindir sayısı      | 1  |
| Çap x Kurs           | 80,26 x 88,9 mm                          |
| Silindir hacmi       | 0,54 L                                   |
| Maksimum devir       | 5400 d/d                                 |
| Maksimum güç         | 15 kW                                    |
| Sıkıştırma oranı     | 13/1                                     |
| Supap sistemi        | Üstten tek eksantrikli                   |
| Supap kalkma miktarı | Emme supabı 5.5mm<br>Egzoz supabı 3.5 mm |
| Yakıt sistemi        | Port tipi yakıt enjeksiyonu              |

**Tablo 2.** Deney yakıtlarının bazı özellikleri

|                                      | Tetrahidrofuran                 | Aseton                          | n-Heptan                       |
|--------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| Kimyasal formülü                     | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O | C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> |
| Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )        | 883                             | 791                             | 679.5                          |
| Oktan sayısı                         | 86                              | 110                             | -                              |
| Alt ısı değer (kJ/kg)                | 38800                           | 29600                           | 45500                          |
| Kaynama noktası (°C)                 | 65                              | 56.1                            | 98                             |
| Kendiliğinden tutuşma sıcaklığı (°C) | 321                             | 560                             | 204                            |

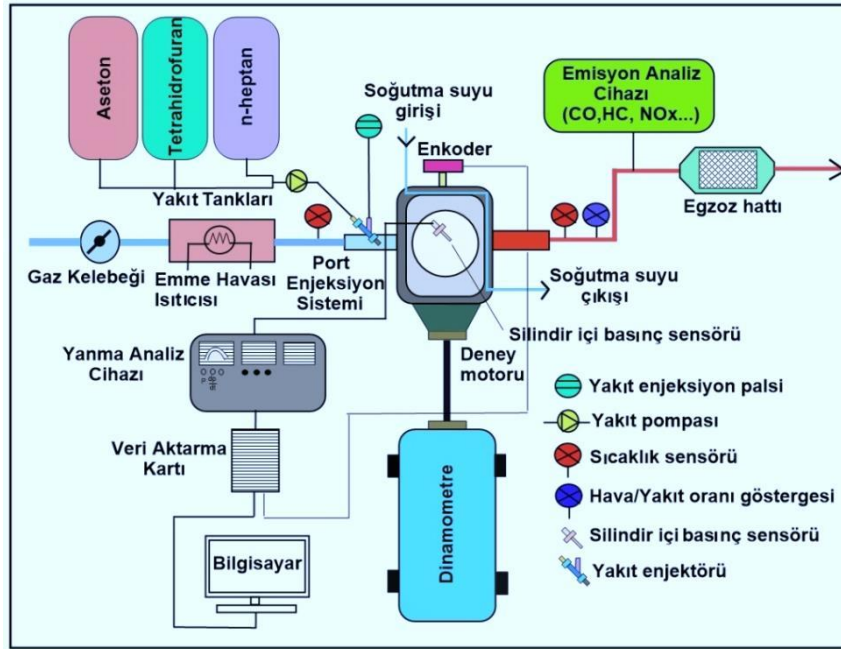
Egzoz emisyonlarının ölçülmesi için Bosch marka egzoz gazı emisyon analiz cihazı kullanılmıştır. Emisyon cihazı CO, CO<sub>2</sub>, HC, NO<sub>x</sub>, motor devri ve hava/yakıt oranını ölçebilmektedir. Egzoz gaz analiz cihazının teknik özellikleri Tablo 3’de verilmektedir.

**Tablo 3.** Egzoz gaz analiz cihazının teknik özellikleri

|                         | Ölçüm Aralığı | Hassasiyet |
|-------------------------|---------------|------------|
| CO (% vol)              | 0.000-10.00   | 0.001      |
| CO <sub>2</sub> (% vol) | 0.00-18.00    | 0.01       |
| HC (ppm)                | 0-9999        | 1          |
| O <sub>2</sub> (% vol)  | 0.00-22.00    | 0.001      |
| $\lambda$               | 0.500-9.999   | 0.001      |
| NO (ppm vol)            | 0-5000        | ≤1         |

Piezo Kistler 6121 marka basınç sensörü ile silindir içi ham basınç verileri deney motorundan alınmıştır. Bu amaçla 0.36 °KA aralıklarla silindir basıncının ölçülmesi ve motor devrinin tespiti için krank miline enkoder bağlanmıştır. Alınan silindir içi basınç sinyalleri Cussons P4110 yanma analiz cihazı ile yükseltilmiştir. Ölçülen analog silindir içi basınç sinyalleri veri aktarım kartı kullanılarak dijital verilere

dönüştürülmüş ve bilgisayar kaydedilmiştir. Ölçülen ham silindir içi basınç sinyalleri MATLAB dilinde hazırlanan bir program ile işlenmiş, yanma karakteristikleri ve motor performans göstergeleri belirlenmiştir.



Şekil 1. Deney düzeneğinin şematik görünümü

Çevrimsel farklılıklardan meydana gelen değişikliklerin azaltılması için ardışık 50 çevrimin silindir basınç verilerinin ortalaması alınarak hesaplama yapılmıştır. Yanma sonu ısı dağılımının belirlenmesi için termodinamiğin birinci kanununa dayalı eşitlik (1) kullanılmıştır. Termodinamiğin birinci kanununa göre silindire alınan karışımın sabit ve ideal gaz olduğu kabulü yapılmıştır. Supaplardan ve segmanlardan gerçekleşen gaz kaçaklarının olmadığı kabul edilmiştir [27-30].

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{k}{k-1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{k-1} V \frac{dP}{d\theta} + \frac{dQ_{heat}}{d\theta} \quad 1$$

Çevrimsel farklılıkların belirlenmesi için eşitlik (2) kullanılmıştır.

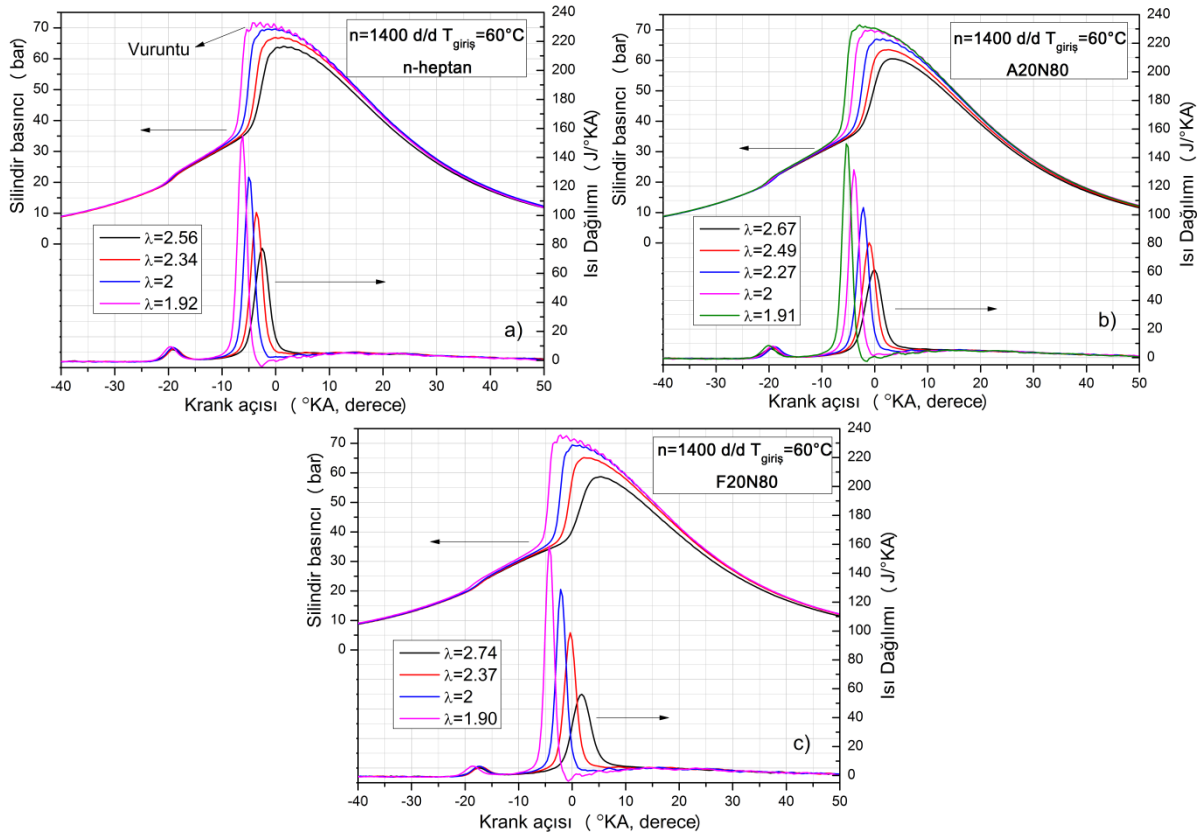
$$COV_{imep} = \frac{\sigma_{imep}}{\bar{X}} \times 100 \quad 2$$

Bu eşitlikte  $\sigma_{imep}$  ardışık 50 çevrim için indike ortalama efektif basınçların standard sapmasını,  $\bar{X}$  indike ortalama efektif basınçların ortalamasını göstermektedir. Silindir basıncı artış oranı ve motor devri vuruğu yoğunluğunu etkilemektedir. Eşitlik (3) vuruğu yoğunluğunun hesabı için kullanılmıştır. Verilen eşitlikte  $\gamma$  politropik indeksi,  $\frac{dP}{dt}$  maksimum basınç artış oranını,  $P_{max}$  ve  $T_{max}$  maksimum basınç ve sıcaklıkları göstermektedir [26-30].

$$RI = \frac{1}{2\gamma} \left( \beta \left( \frac{dP}{dt} \right)_{max} \right)^2 \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T_{max}} \quad 3$$

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

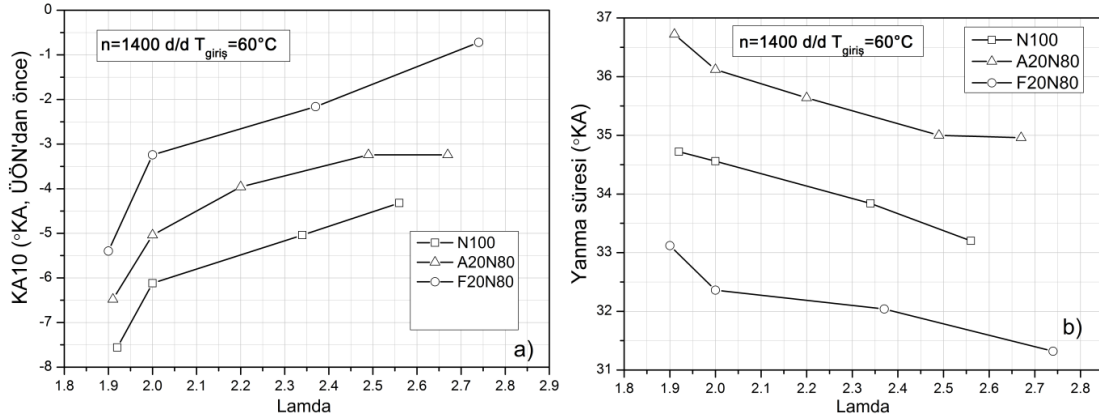
HCCI yanması kimyasal kinetikler tarafından kontrol edilmektedir. Yanma, yanma odasının genelinde aniden eş zamanlı olarak gerçekleşmektedir. Buji ile ateşlemeli yanmadaki alev cephesinden farklı olarak homojen karışımın hızlı bir şekilde infilak ederek tutuşması ve kendiliğinden yanması görülmektedir. Dolayısıyla yakıtın kimyasal ve fiziksel özellikleri yanma başlangıcını etkilemektedir. Şekil 2’de n-heptan aseton/n-heptan (A20N80) ve tetrahidrofuran/n-heptan (F20N80) yakıt karışımları ile elde edilen silindir basıncı ve ısı dağılımı grafikleri görülmektedir. Hava/yakıt oranı fakirleştikçe silindir basıncının ve ısı dağılımının azaldığı görülmektedir. N-heptan ile yapılan çalışmada yakıtın vuruntu direnci olmadığından vuruntu eğilimi görülmüştür. Karışım fakirleştikçe maksimum silindir basıncı tüm test yakıtları için azalmıştır. Yanma odasındaki yakıt konsantrasyonu azaldıkça açığa çıkan ısı enerjisi ve elde edilen basınç azalmaktadır.



Şekil 2. Silindir basıncı ve ısı dağılımı değişimi

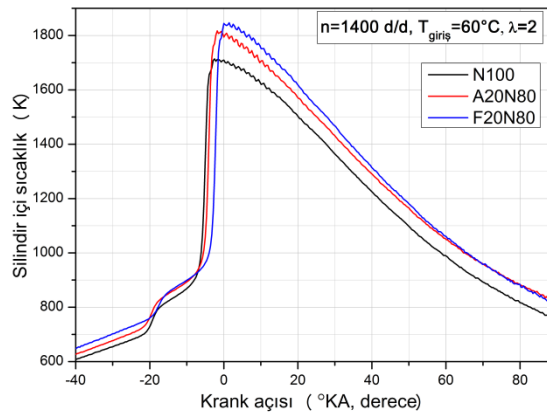
N-heptan yakıtına aseton ve tetrahidrofuran ilavesi ile açıkça görülmektedir ki vuruntu eğilimi azalmaktadır. Oktan sayısı yüksek yakıtların ilavesi kendiliğinden tutuşma şartlarını zorlaştırmaktadır.  $\lambda=1.90$ 'da F20N80 yakıtı ile maksimum silindir basıncı elde edilmiştir. Şekil 3-a lamdaya bağlı KA10 değişimini göstermektedir. KA10 karışımın %10'luk bölümünün yanmasını gerçekleştirdiği krank açısını ifade etmektedir. Literatürde yanma başlangıcı olarak da ifade edilebilmektedir. Lamda arttıkça yanma başlangıcının rötara çekildiği görülmüştür. Yakıt moleküllerinin azalması kendiliğinden tutuşma temayülünü azaltmakta, yanma gecikmektedir. Aseton ve tetrahidrofuran ilavesi ile HCCI yanması n-heptana göre geciktirilmiştir. Aseton ve tetrahidrofuranın n-heptana göre yüksek oktan sayısı kendiliğinden gerçekleşen oksidasyon reaksiyonlarını rötara almaktadır. Maksimum KA10 değerleri F20N80 yakıtı ile elde edilmiştir. Yanma süresi karışımın %10 ile %90'ının yanmasını tamamladığı süre arasında kalan krank açısı cinsinden ifade edilebilmektedir. Yanmanın son aşamalarına doğru silindir cidarlarına transfer edilen ısı ve silindir sıcaklığı değişmekte yanmanın tam olarak ne zaman tamamlandığını belirtmek güç olmaktadır. Şekil 3-b test yakıtları ile lamdaya bağlı yanma süresi değişimini göstermektedir. Lamda arttıkça yanma süresinin kısaldığı görülmektedir. Hava fazlalığı arttıkça oksidasyon için bekleyen yakıt molekülü sayısı azalmakta yanma daha erken tamamlanabilmektedir. Aynı zamanda fakir karışımda yanma

sonu gaz sıcaklığı azalmakta alev cephesi daha kısa sürede sona ermektedir. A20N80 yakıtı ile diğer yakıtlara göre yanma süresi daha fazla uzamıştır. F20N80 ile yanma hızının artarak yanma süresinin kısaldığını ifade etmek mümkündür. Tetrahidrofuranın kendiliğinden tutuşma sıcaklığı n-Heptandan yüksek olduğundan yanma süresi n-heptana göre kısalmıştır. Bununla birlikte asetonun yüksek oktan sayısı yanmanın geç başlamasına toplam yanma süresinin uzamasına neden olduğu görülmüştür.



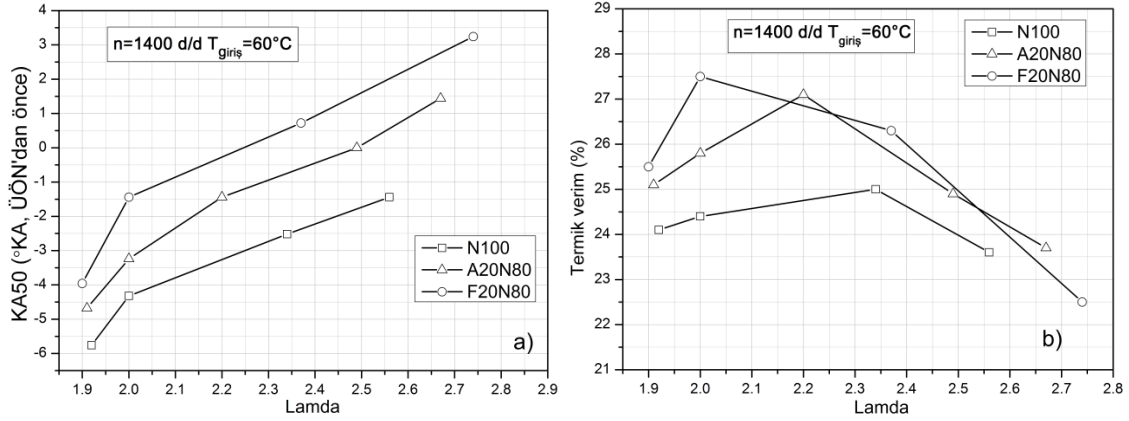
Şekil 3. Yanma başlangıcı ve yanma süresi

Şekil 4'de test yakıtları ile  $\lambda=2$ 'de hesaplanan silindir içi gaz sıcaklığı değişimi görülmektedir. Maksimum silindir içi gaz sıcaklığı F20N80 yakıtı ile elde edilmiştir. N-heptan yakıtının yüksek kaynama noktası buharlaşma esnasında ortamdan daha fazla ısı çekilmesine neden olmakta, silindir içi sıcaklık sıkıştırma kursu boyunca daha düşük değerlerden artmaya başlamaktadır. N-heptan yakıtının kalorifik enerjisi diğer yakıtlara göre yüksek olmasına rağmen silindir içi sıcaklığın azaldığı görülmüştür.



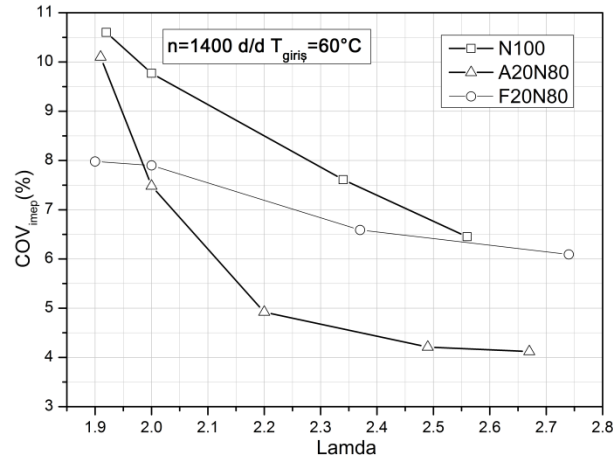
Şekil 4. Silindir içi sıcaklık değişimi

Şekil 5'de lamdanın KA50 ve termik verim üzerindeki etkileri görülmektedir. KA50 karışım kütlelerinin yarısının yanmasını tamamladığı krank açısını ifade etmektedir. Lamda arttıkça tüm yakıtlar için KA50 rötara alınmaktadır. KA10 değerine benzer şekilde hava fazlalığı arttıkça KA50 uzamaktadır. Karışımın fakirleşmesi alev sıcaklığının azalmasına silindir cidarında alevin daha erken sönmeye neden olmaktadır. Bu durum yanma oranının azalmasına sebep olmaktadır. N-heptanın vuruntu direncinin ve kendiliğinden tutuşma sıcaklığının düşük olması KA50 değerini avansa almaktadır. Kendiliğinden oksidasyon reaksiyonları daha kolay gerçekleşmektedir. Maksimum KA50 F20N80 yakıtı ile hesaplanmıştır. Şekil 5-b termik verim değişimini göstermektedir. Tüm test yakıtları için termik verim belli bir lamdaya kadar artmakta daha sonra azalmaya başlamaktadır. Karışımın bir miktar fakir olması yakıt moleküllerinin oksidasyonu için gerekli oksijen konsantrasyonunu sağlamaktadır. Ancak karışımın aşırı fakir olması açığa çıkan ısının ve yanma sonu gaz sıcaklığının azalmasına neden olmaktadır. Yakıt enerjisinin net işe dönüşüm oranı azalmaktadır. KA50 ile termik verim arasında yakın bir ilişki bulunmaktadır. Termik verimin yüksek olması için KA50 değerinin üst ölü noktayı hemen geçtikten sonra elde edilmesi gerekmektedir. Maksimum termik verim  $\lambda=2$ 'de F20N80 yakıtı ile %27.5 olarak belirlenmiştir. Vuruntu eğilimine bağlı olarak minimum termik verim n-heptan ile belirlenmiştir.



**Şekil 5. Lamdanın KA50 ve Termik verim üzerindeki etkisi**

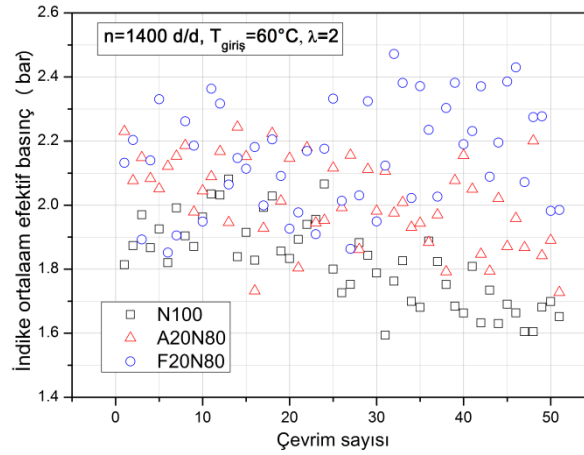
Şekil 6 lamdaya bağlı test yakıtları ile belirlenen çevrimsel farklılıkları göstermektedir. Çevrimsel farklılıklar yanma odasındaki karışım kütlelerinin kompozisyonuna, art gaz miktarına, sıkıştırma kursu sonundaki karışımın termodinamik haline bağlı olarak görülmektedir. Kararlı bir yanma için çevrimsel farklılıkların %10'u geçmemesi istenmektedir. Bu motorun kararlılığını ve sürekliliğini ifade eden bir parametredir. Bu çalışmada imep değerlerine bağlı çevrimsel farklılıklar ele alınmıştır. Şekil 6'da görüldüğü gibi lamda arttıkça çevrimsel farklılıklar azalmaktadır. Zengin karışımlara doğru yanmada görülen kararsızlık çevrimsel değişikliklere neden olmaktadır ki bu durum özellikle vuruntu eğiliminin görüldüğü noktalarda fark edilmektedir. Karışımın fakirleşmesi yanma sonu gaz sıcaklığının azalmasına reaksiyon hızının yavaşlamasına neden olmaktadır. HCCI yanması bu durumda daha istikrarlı sağlanabilmektedir. Maksimum  $COV_{imep}$  n-heptan ile  $\lambda=1.92$ 'de %10.6 olarak hesaplanmıştır. N-heptan ile görülen vuruntu eğilimi silindir içi basınç dalgalanmalarının artmasına neden olmakta, motor parçalarına gelen yük ani ve hızlı basınç artışı ile artmaktadır.



**Şekil 6.  $COV_{imep}$  değişimi**

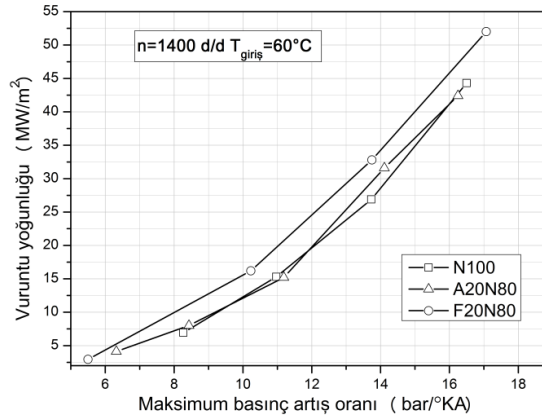
Oktan sayısı yüksek tetrahidrofur ve aseton kendiliğinden tutuşmanın kontrol altına alınmasına yardımcı olmakta, yanma oranı yavaşlatılabilmektedir. Sonuçta sabit devir ve emme havası giriş sıcaklığında n-heptana göre karışım yakıtları ile çevrimsel farklılıklar azalmaktadır. Şekil 7'de test yakıtları ile ardışık 50 çevrime bağlı imep değerleri görülmektedir. N-heptan yakıtının yüksek kalorifik enerjisine rağmen imep değerlerinin azaldığı görülmüştür. Meydana gelen vuruntu silindir içi basınç dalgalanmalarının görülmesine neden olarak piston üzerine uygulanan basıncın azalmasına sebep vermektedir. F20N80 yakıtı ile imep değerlerinin arttığı görülmektedir. Tetrahidrofur yakıtının yüksek yoğunluğu birim hacimde reaksiyona sokulan kütle cinsinden yakıt miktarının artışına neden olmakta ve imep artmaktadır. Açığa çıkan ısı miktarı kütlece yanan yakıt miktarı arttığından uygulanan basınç artmaktadır. Maksimum imep n-heptan, A20N80 ve F20N80 yakıtları ile  $\lambda=2$ 'de sırasıyla 2.08 bar, 2.24 bar ve 2.47 bar elde edilmiştir.





**Şekil 7.** Ardışık 50 çevrime bağlı imep değerleri

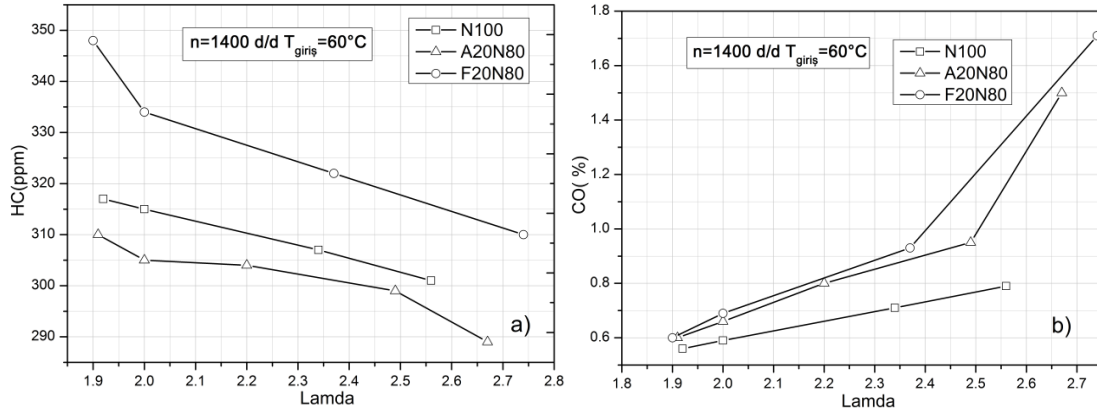
Vuruntu HCCI motorlarda özellikle yüksek yüklerde görülen bir problemdir. Vuruntu yoğunluğu maksimum silindir basıncı, basınç artış oranı ve motor devrine bağlı olarak değişmektedir. HCCI motorlarda vuruntu limiti basınç artış oranı ile ilişkilendirilmektedir [31]. Vuruntu genişleme hızının ses hızından daha yüksek olduğu durumda görülmektedir [32]. Şekil 8 maksimum basınç artış oranına bağlı vuruntu yoğunluğunu göstermektedir. Karışım zenginleştikçe reaksiyona giren yakıt molekülü sayıları ve yanma sonu gaz basıncı artmaktadır. Krank açısı değişimi başına piston üzerine uygulanan basınç aşırı artmaktadır. Aynı zamanda yanma odasında kızgın noktaların tutuşması basıncın dengelenmesi için çok hızlıdır. Sonuçta basınç dalgalanmaları görülmektedir.



**Şekil 8.** Maksimum basınç artış oranına bağlı vuruntu yoğunluğu değişimi

Stokiyometrik karışım oranına doğru vuruntu yoğunluğu artmaktadır. N-heptan yakıtına aseton ve tetrahidrofuran ilave edildiğinde benzer vuruntu yoğunluğu değerleri elde edildiğini ifade etmek mümkündür. Ancak sabit maksimum basınç artış oranı değerinde F20N80 yakıtı ile vuruntu yoğunluğu daha fazla elde edilmiştir. Tetrahidrofuran yakıtının yoğunluğu ve kalorifik enerjisinin asetona göre yüksek olması oksidasyon reaksiyonlarının iyileşmesine yanma sonu basıncının ani olarak artmasına neden olmaktadır. Sonuçta vuruntu yoğunluğu asetona göre artmaktadır. HCCI yanması düşük sıcaklıklarda meydana geldiğinden yakıt moleküllerinin tamamının oksidasyonu için gerekli sıcaklık yetersiz kalabilmektedir. Aynı zamanda eksik yanma ürünü olan CO oluşumu hızlanmaktadır. Şekil 9-a'da lamdaya bağlı HC emisyonlarının değişimi görülmektedir. Tüm test yakıtları için lamda arttıkça HC azalmaktadır. Hava fazlalığı arttıkça yanma odasında yakıtın oksidasyonu için yeterli oksijen konsantrasyonu sağlanabilmekte, HC azalmaktadır. Zengin karışımlara doğru özellikle daha soğuk silindir cidarlarına yakın bölgelerde yakıtın tutuşturulamaması sonucu alev sönebilmektedir. Sonuçta HC oluşumu görülmektedir. HCCI yanmasında yanma odasının genelinde eş zamanlı bir yanma olmasına rağmen yakıt özelliklerine ve alevin sönmeye bağlı olarak HC emisyonu görülebilmektedir. Maksimum HC  $\lambda=1.90$ 'da F20N80 yakıtı ile 348 ppm ölçülmüştür. Tetrahidrofuranın yoğunluğunun yüksek olması kütlece yanmayı bekleyen miktarın artmasına neden olmaktadır. Yeterli oksijen bulamayan yakıt tam olarak tutuşturulamadan

çevrimden atılmaktadır. Sonuçta HC artmaktadır. Minimum HC  $\lambda=2.67$ 'de A20N80 yakıtı ile 289 ppm ölçülmüştür. Asetonun kaynama noktasının düşük olması buharlaşma esnasında ortamdaki ısının azalmasına neden olmaktadır. Bu durum sıkıştırma stroku boyunca yanma odası sıcaklığının düşmesini engellemektedir. Aynı zamanda asetonun düşük yoğunluğu birim hacimde kütle bakımından yanmayı bekleyen yakıt miktarını azaltmakta, tam yanma eğilimi meydana gelmektedir. Şekil 9-b'de ise lamdaya bağlı CO değişimi görülmektedir. Lamda arttıkça tüm yakıtlar için CO artmaktadır. Hava fazlalığı arttıkça yanma sonu gaz sıcaklığı azalmakta oksidasyon reaksiyonları yavaşlamaktadır. Bu durum eksik yanmaya neden olmakta, CO formasyonu görülmektedir. Maksimum CO  $\lambda=2.56$ 'da n-heptan ile %0.79,  $\lambda=2.67$ 'de A20N80 ile %1.5 ve  $\lambda=2.74$ 'de F20N80 ile %1.71 ölçülmüştür. CO yanma odasında oksijen yetersizliğine bağlı olarak oluşabilmektedir. Asetonun yüksek oksijen içeriği yakıtın oksidasyonu için yeterli oksijenin ihtiva edilmesine olanak sağlamakta, CO oluşum tetrahidrofurana göre azalmaktadır. N-heptanın vuruntuya karşı direncinin olmaması basıncın ve sıcaklığın ani olarak artmasına neden olmakta, CO  $\text{CO}_2$ 'e dönüşebilmektedir. Sonuçta CO oluşumu engellenebilmektedir.



Şekil 9. HC ve CO emisyonlarının lamdaya bağlı değişimi

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

HCCI yanmasında özellikle yüksek yüklerde ve zengin karışım oranlarında vuruntu eğilimi görülmektedir. Aynı zamanda fakir homojen karışımın yanması sonucu yanma sonu gaz sıcaklığı azaldığından HC ve CO oluşumu görülmektedir. Kendiliğinden tutuşma şartları yakıtın fiziksel özelliklerinden etkilenmektedir. Bu çalışmada n-heptan yakıtına aseton ve tetrahidrofuran ilavesinin yanma ve performans karakteristikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Aseton ve tetrahidrofuran yakıtlarının vuruntu eğilimini azalttığı görülmüştür. Lamda arttıkça silindir basıncı ve ısı dağılımı azalmıştır.  $\lambda=2$ 'de termik verim F20N80 yakıtı ile A20N80 ve n-heptan yakıtına göre sırasıyla %6.5 ve %12.7 artmıştır. A20N80 ve F20N80 yakıtları ile n-heptana göre daha yüksek imep değerleri elde edilmiştir.  $\lambda=2$ 'de A20N80 yakıtı ile F20N80 ve n-heptana göre HC %9.5 ve %3.17 azalmıştır. Sonuçta aseton ve tetrahidrofuran yakıt karışımları ile deney motorunun 1400 d/d'da  $\lambda=1.90$  ile  $\lambda=2.67$  lamda aralığında HCCI yanma modunda kararlı bir şekilde çalıştığı, HCCI çalışma aralığının vuruntu bölgesinde genişletilebileceği görülmüştür.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] C.H. Zhang, J.R. Pan, J.J. Ton, J. Li, „Effects of Intake Temperature and Excessive Air Coefficient on Combustion Characteristics and Emissions of HCCI Combustion, in 2011 2nd International Conference on Challenges in Environmental Science and Computer Engineering, Q. Zhou, Editor. Elsevier Science Bv: Amsterdam, (2011) 1119-1127.
- [2] H.F. Liu, J. Xu, Z.Q. Zheng, S.J. Li, M.F. Yao, Effects of Fuel Properties on Combustion and Emissions Under Both Conventional and Low Temperature Combustion Mode Fueling 2,5-Dimethylfuran/Diesel Blends, Energy, (2013) 62:215-23.

- [3] J. Benajes, S. Molina, A. García, E. Belarte, M. Vanvolsem, An Investigation on RCCI Combustion in A Heavy Duty Diesel Engine Using in Cylinder Blending of Diesel and Gasoline Fuels, *Applied Thermal Engineering*, (2014) 63, 66-76.
- [4] D. Splitter, M. Wissink, D. DelVescovo, R. Reitz, RCCI Engine Operation Towards 60% Thermal Efficiency, SAE International, (2013) 2013-01-0279.
- [5] F. Aksoy, E. Yılmaz, %10 Balık Yağı Biyodizeli-%90 Dizel Yakıt Karışımı İle Çalışan Direkt Enjeksiyonlu Bir Dizel Motorunda Yanma ve Performans Karakteristiklerinin İncelenmesi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 7(1) (2019) 12-24.
- [6] S. Polat, H. Solmaz, H.S. Yücesu, A. Uyumaz, Bir Dizel Motorunun Bilgisayar Yardımı İle Termodinamik ve Performans Analizi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 1(3) (2013)139-151.
- [7] A. Uyumaz, F. Boz, Ş.A. Baydır, Direkt Enjeksiyonlu Bir Dizel Motorunda Atık Zeytinyağı Biyodizelinin Yanma, Performans ve Emisyon Karakteristikleri, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6(1) (2018) 55-65.
- [8] R.D Reitz, G. Duraisamy, Review of High Efficiency and Clean Reactivity Controlled Compression Ignition (RCCI) Combustion in Internal Combustion Engines, *Progress in Energy and Combustion Science*, in-press.(2014) 1-60.
- [9] R. Stone, Introduction to Internal Combustion Engines, Macmillan Press Ltd, ISBN 0-333-74013-0, Tesseroux, I.; Toxicoll, Lett., 2004, 149, (1999) 295-300.
- [10] J. A. Eng., Characterization of Pressure Wave Oscillation in HCCI Combustion, SAE Paper 2002-01-2859. (2002).
- [11] H.W. Wu, R.H. Wang, D.J. Ou, Y.C. Chen, T.Y. Chen, Reduction of smoke and nitrogen oxides of a partial HCCI engine using premixed gasoline and ethanol with air, *Applied Energy*, 88(11) (2011) 3882-3890.
- [12] M.T. Garcia, F.J.J.E. Aguilar, T.S. Lencero, J.A.B. Villanueva, A New Heat Release Rate (HRR) Law For Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Combustion Mode, *Applied Thermal Engineering*, 29(17-18) (2009) 3654-3662.
- [13] F. Hadia, S. Wadhah, H. Ammar, O. Ahmed, Investigation of Combined Effects of Compression Ratio and Steam Injection on Performance, Combustion and Emissions Characteristics of HCCI Engine, *Case Studies in Thermal Engineering*, 10 (2017) 262-271.
- [14] H.J. Curran, A.P. Gaffuri, A.P.J. Pitz, A.J.K. Westbrook, A Comprehensive Modeling Study of n-heptane Oxidation, Combustion and Flame, 114(1-2) (1998) 149-177.
- [15] J.E. Dec, and M. Sjöberg, Isolating The Effects of Fuel Chemistry on Combustion Phasing in an HCCI Engine and The Potential of Fuel Stratification for Ignition Control, SAE paper. 2004-01-0557.
- [16] X.C. Lu, H. Yuchun, Z. Linlin, H. Zhen, Experimental Study on The Auto-Ignition and Combustion Characteristics in The Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Combustion Operation with Ethanol/N-Heptane Blend Fuels by Port Injection, *Fuel*, 85(17-18) (2006) 2622-2631.
- [17] C.H. Zhang, J.R. Pan, J.J. Tong, J. Li, Effects of Intake Temperature and Excessive Air Coefficient on Combustion Characteristics and Emissions of HCCI Combustion, in 2011 2nd International Conference on Challenges in Environmental Science and Computer Engineering, Q. Zhou, Editor. Elsevier Science Bv: Amsterdam, (2011) 1119-1127.

- [18] M. Gautam, D.W. Martin, Combustion Characteristics of Higher-alcohol/gasoline Blends, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part a-Journal of Power and Energy, 214(A5) (2000) 497-511.
- [19] A.Turkcan, A.N. Ozsezen, M. Canakci, Experimental investigation of the Effects of Different Injection Parameters on a Direct Injection HCCI Engine Fueled with Alcohol-gasoline Fuel Blends, Fuel Processing Technology, 126 (2014) 487-496.
- [20] M.M. Hasan, M.M. Rahman, K. Kadirgama, D. Ramasamy, Numerical Study of Engine Parameters on Combustion and Performance Characteristics in an n-heptane Fueled HCCI Engine, Applied Thermal Engineering, 128 (2018) 1464-1475.
- [21] A. Uyumaz, 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 (2015) 199-207.
- [22] C. Çınar, A. Uyumaz, H. Solmaz, F. Şahin, S. Polat, E. Yılmaz, 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% isooctane fuels, Fuel Processing Technology, 130 (2015) 275–281.
- [23] C. Çınar, A. Uyumaz, H. Solmaz, T. Topgül, Effects of Valve Lift on the Combustion and Emissions of a HCCI Gasoline Engine, Energy Conversion and Management, 94 (2015) 159–168.
- [24] B.Q. He, M.B. Liu, J. Yuan, H. Zhao, Combustion and Emission Characteristics of a HCCI Engine Fuelled with n-butanol-gasoline Blends, Fuel, 108 (2013) 668-674.
- [25] J.H. Mack, D. Schuler, R.H. Butt, R.W. Dibble, Experimental Investigation of Butanol Isomer Combustion in Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Engines, Applied Energy, 165 (2016) 612-626.
- [26] A. Calam, H. Solmaz, E. Yılmaz, Y. İçingür, Investigation of Effect of Compression Ratio on Combustion and Exhaust Emissions in A HCCI engine, Energy, 168 (2019) 1208-1216.
- [27] H. Zhao, HCCI and CAI Engines For The Automotive Industry, Cambridge England: Woodhead Publishing Ltd. (2007).
- [28] J.B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, New York: McGraw- Hill, (1988)
- [29] S. Polat, K. Kannan, M. Shahbakhti, A. Uyumaz, H.S. Yücesu, An Experimental Study for the Effects of Supercharging On Performance and Combustion of an Early Direct Injection HCCI Engine, Second International Reserch Conference On Engineering, Science and Management, Dubai, (2015).
- [30] A. Uyumaz, H. Solmaz, RCCI Bir Motorda Enjeksiyon Zamanlaması ve Lamdanın Yanma ve Performans Karakteristikleri Üzerindeki Etkilerinin Deneysel İncelenmesi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 4(4) (2016) 299-308.
- [31] D. Yap, J. Karlovsky, A. Megaritis, M.L. Wyszynski, H. Xu, An Investigation into Propane Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Engine Operation with Residual Gas Trapping, Fuel, 84 (2005) 2372–2379.
- [32] P.E. Yelvington, W.H. Green, Prediction of the Knock Limit and Viable Operating Range for a Homogeneous-Charge, Compression-Ignition (HCCI) Engine, SAE Paper 2003-01-1092, (2003).