

PORT TIPI ETANOL YAKIT ENJEKSİYONLU HCCI MOTORUNDA MOTOR YÜK DEĞERİNİN YANMA KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİSİ

Özer CAN^{a*}, H. Serdar YÜCESU^a, Can ÇINAR^a,
Ayhan BAYDIR^b, Fatih ŞAHİN^a, Erkan ÖZTÜRK^c

^a Gazi Üniv., Teknoloji Fak., Otomotiv Müh. Bölümü, Ankara, Türkiye
^b Afyon Kocatepe Üniv., Teknik Eğitim Fak., Otomotiv A.B.D., Afyon, Türkiye
^c Pamukkale Üniv., Teknik Eğitim Fak., Otomotiv A.B.D., Denizli, Türkiye

Özet

Bu çalışmada, tek silindirli, direkt enjeksiyonlu (DI) ve 18:1 sıkıştırma oranına sahip bir dizel motorunda, yüksek oktana sahip etanol yakıtı ile motor yükü değeri (1,5 - 4,2 bar *imep*) HCCI yanma karakteristiği üzerine etkileri incelenmiştir. Port tipi yakıt enjeksiyonu ile ön karışım odasında homojen ön karışım, dolgu oluşturulmuştur. 2200 d/dk motor hızında, minimum 80 °C dolgu giriş sıcaklığı ile HCCI yanma konumunda tutulması sağlanabilmektedir. Düşük yüklerde (1,5 bar ve 2,4 bar *imep*) eksik yanma ya da tekleme meydana gelmekte ve COV_{imep} değerleri düzensiz çalışmaya, sıkıştırma oranı üzerinde kalmaktadır. Bu nedenle, düşük yüklerde 80 °C üzerine ön sıkıştırma sıcaklıkları, gerekli olmaktadır. Yük arttıkça, birlikte 4,2 bar *imep*’de aşırı vuruntu sıkıştırma oranı üzerine çökülmeye, tır. Yüksek yüklerde, yanma başlangıcı ve yanma oranının kontrolü için, ön sıkıştırma sıcaklığına bağlı olarak EGR uygulaması, gerekli olmaktadır.

Anahtar Kelimeler: HCCI, Etanol, Yanma, Port Tipi Yakıt Enjeksiyonu

* Yazınmacı, yazar. Tel: +90 312 2028653; E-posta: ozercan@gazi.edu.tr

Effects of Engine Loads on Combustion Characteristics of a Port Type Ethanol Fuel Injected HCCI Engine

Abstract

In this study, effects of engine load (1.5 to 4.2 bar *imep*) on HCCI combustion characteristics were investigated with high octane ethanol fuel, on a single cylinder, direct injection (DI) diesel engine having 18:1 compression ratio. Premixed homogeneous fuel charge was prepared with port type fuel injection in the pre-mixing chamber. In HCCI combustion mode, at 2200 rpm engine speed, auto-ignition was achieved with minimum intake temperature of 80 °C. At the low engine loads (between 1.5 and 2.4 bar *imep*), incomplete combustion or misfiring occurred and COV_{imep} values were over the unstable operation limit. Therefore, pre-heating temperatures above 80 °C are required at the low engine loads. With the increase of the engine load, the knocking limit was exceeded at the 4.2 bar *imep*. At higher engine loads, EGR application depending on the pre-heating of charge is required to control the start of combustion and combustion rate.

Keywords: HCCI, Ethanol, Combustion, Port Type Fuel Injection

1. Giriş

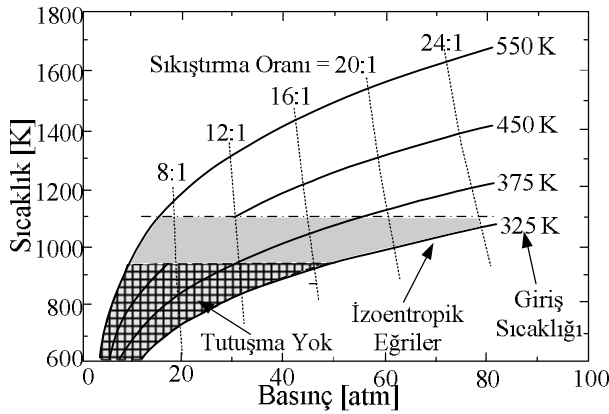
Homojen dolgu sıkıştırma ile ateşlemeli motorlar (HCCI), çok düşük NO_x ve PM emisyonları ile DI Dizel motorlar kadar yüksek termik verime ulaşabilmektedirler [1]. Bu yüzden, buji ile ateşlemeli motorlarda termik verim ile yakıt tüketiminin iyileştirilebilmesi, dizel motorlarda ise egzoz sonrası uygulamaların gerekliliğinin ortadan kaldırabilmesi amacıyla, HCCI yanma kavramının alternatif olarak uygulanması, gelecek vaat etmektedir [1]. Silindir dışı, arızada ya da silindir içerisinde homojen ve seyreltilmiş olarak hava/yakıt karışımının hazırlanmasında, homojen dolgu veya emme havası, herhangi bir kısılmaya mazur kalmadan silindir içerisine alınmaktadır. Hazırlanan homojen ve fakir dolgunun sıkıştırma zamanı sonunda belli bir sıcaklık, alev hızı ile yanma odasının birçok yerinde eş zamanlı olarak kendi kendine tutulmaktadır. Homojen ve fakir dolgunun eş zamanlı olarak yanması, sonucunda, silindir içerisindeki bölgesel sıcaklıklar, buji ile ateşlemeli motorlardaki alev cephesinin önünde ya da dizel yakıt huzmesinin stokiyometrik bölgelerinden daha düşük olmakta ve termal NO_x ile PM emisyonlarının oluşumu azalmaktadır [2-6].

HCCI motorlarda problem oluşturulan temel durum; tutulması başlangıcının tamamen kimyasal kinetik ile gerçekleşmesidir. Yanma başlangıcından önce, yakıt kompozisyonu, eşdeğerlik oranı ya da motor yüküne bağlı olarak termodinamik özelliklerin (dolgu sıcaklığı, gibi) kimyasal kinetik için gerekli olan artlarla yüksek

oranda tekrarlanabilirlik ile elemesi gerekmektedir [7]. Deneysel çal, malarda HCCI çal, ma konumunda yanmanın olu turulabilmesi için, motorun önceden belirli bir hızda çal, t,r,lararak ön ,s,tma ve/veya EGR uygulamas, ile uygun ön ko ullar, n daha kararlı bir ekilde sa lanabilmesi gerekli olmaktadır.

Port tipi yak,t enjeksiyon sistemi ile silindird, , homojen kar, ,m te killinde kullan,lacak yak,tlar, n uygun viskoziteye, dü ük kaynama noktas, na ve uçuculu a sahip olmas, gerekmektedir. Aksi durumlarda, manifold duvarlar, nda yak,t filmi olu umu meydana gelebilmekte ve böylece her bir çevrimde silindire al, nan dolgu miktar, nda de i im ortaya ç,kabilmektedir. Bu durum, motorun çal, mas, nda çevrimden çevrime farklı, l,klar, n artmas, na yol açabilmektedir. Silindir duvarlar, nda ,slanma meydana geldi inde ise yüksek HC olu umuna neden olmaktadır. Yenilenebilir yak,tlardan etanolün destilasyon karakteristi i incelendi inde, ilk kaynama noktas, di er konvansiyonel yak,tlara göre oldukça dü ük s,cakl, kta (~78 °C) ba lamaktadır. Dizel yak,tlar, için ilk kaynama noktas, için yakla ,k 180-190 °C s,cakl, , aral, ,na ula ,lmas, gerekmektedir. Bu nedenle port tipi yak,t enjeksiyonlu bir sistemde, s,k, t,rma zaman, ba lang,c, nda etanol kolayca buharla abilmekte ve ön kar, ,ml, homojen dolgu sa lanabilmektedir. Etanolün buharla ma gizli ,s,s, oldukça yüksek olmakla birlikte, mükemmel fakir yanma özelli ine sahiptir. Fakat dü ük enerji yo unlu una ve dü ük setan say,s, na sahip oldu undan dizel motor çal, ma ko ullar, nda kullan,m, zor olmaktadır [8].

Farklı, e de erlik oranlar, nda etanolün kendi kendine tutu ma s,cakl, , yakla ,k olarak 930-1050 K aras, nda de i im göstermektedir [1, 9]. CHEMKIN ile yap, lan bir modelleme çal, mas, nda ise yakla ,k olarak 960 K s,cakl, ,na kadar etanolün kararlı, halde reaksiyonlara kat, lmad, , belirlenmi tir [1, 9]. Bu nedenle, s,k, t,rma sonunda bahsedilen bu s,cakl, k aral, ,na ula abilmek için, ön kar, ,ml, homojen dolgunun giri s,cakl, ,n, n artt,r, lmas, gerekli olmaktadır. ekil 1'de dizel çal, ma konumuna benzer ko ullarda etanol yak,t, ile yap, lan bomba deneylerinin sonuçlar, görülmektedir [9].



ekil 1. Etanol yak,t, n, n Dizel motor ko ullar, nda kendi kendine tutu ma yetene i [7]

ekilde farklı, dolgu giri s,cakl, klar, nda elde edilen izoentropik e riler üzerinde s,k, t,rma oranlar, na ba l, olarak silindir gaz s,cakl, klar, n, n de i imi görülmektedir. 18:1 s,k, t,rma oran, na sahip atmosferik bir motorda, piston ÜÖN'da iken dolgu s,cakl, ,n, n minimum tutu abilme s, n, r, olarak (~ 950 K) ekilde görülen taral, bölgenin üzerinde ve eksen çizgisi ile gösterilen 1100 K aras, ndaki bir s,cakl, k de erine ula abilmek için, ön ,s,tma s,cakl, ,n, n yakla ,k olarak, en az ~ 80 °C civar, nda olmas, gerekti i görülmektedir.

Bu çal, mada, minimum emme dolgusu giri s,cakl, , ile 18:1 s,k, t,rma oran, na sahip bir dizel motorunda HCCI yanmas, n, n sa lanabilmesi amaçlanm, t,r. İlk olarak dizel çal, ma konumunda istenilen motor hız, na (2200 d/dk) ula ,ld,ktan sonra, ön kar, ,ml, etanol enjeksiyonunun artt,r, lmas, ile dizel yak,t enjeksiyonu kademeli olarak azalt, larak deney motoru HCCI yanma konumunda çal, lm, t,r. Yap, lan ön denemeler do rultusunda, minimum 80 °C ön ,s,tma s,cakl, , nda haz, rlanan ön kar, ,ml, homojen dolgunun tutu mas, sa lanabilmi ve deneylere ba lanm, t,r. Motor yük art, ,n, n çevrimsel farklılara, vuruntu e ilimine ve yanma karakteristi ine etkileri ara t,r, lm, t,r.

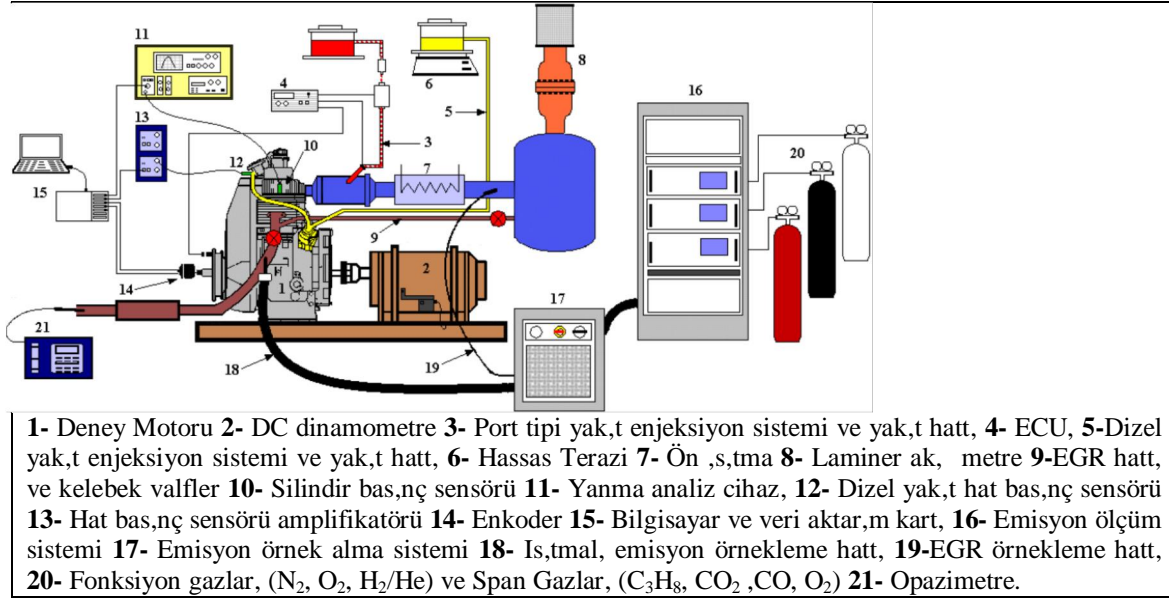
2. Deney Düzenesi

Deneysel çal, malarda tek silindirli, dört zamanlı, direkt enjeksiyonlu bir dizel motor kullan, lm, t,r. Deney motorunun teknik özellikleri Tablo 1'de verilmi tir. ekil 2'de deney düzenesi ninematik ekli görülmektedir. Homojen ön kar, ,ml, dolgunun olu turulmas, ve manifold duvarlar, nda yak,t filmi olu umuna engel olabilmek için ön kar, ,m odas, (emme manifoldu) yakla ,k 3,5 L hacminde imal edilmi tir. Dü ük basınçlı, port tipi yak,t enjeksiyon sistemi ön kar, ,m odas, na adapte edilmi tir. Yak,t enjektörü emme portunun

yaklaşık 200 mm ötesine yerleştirilmiş ve elektronik kontrol ünitesi ile enjeksiyon süresi kontrol edilmiştir. Ön karıştırıcı olarak Tablo 2'de özellikleri verilen etanol kullanılmıştır.

Tablo 1. Deney motorunun genel özellikleri

Motor Tipi	DI-Dizel motor
Silindir Sayısı	1
Çap x Strok [mm]	86 x 68
Silindir hacmi [cm ³]	395
Sıkıştırma Oranı	18:1
Maksimum Güç [kW]	5,4 @ 3000 d/dk
Maksimum Tork [Nm]	19,6 @ 2200 d/dk



Şekil 2. Deney sistemininematik görünümü

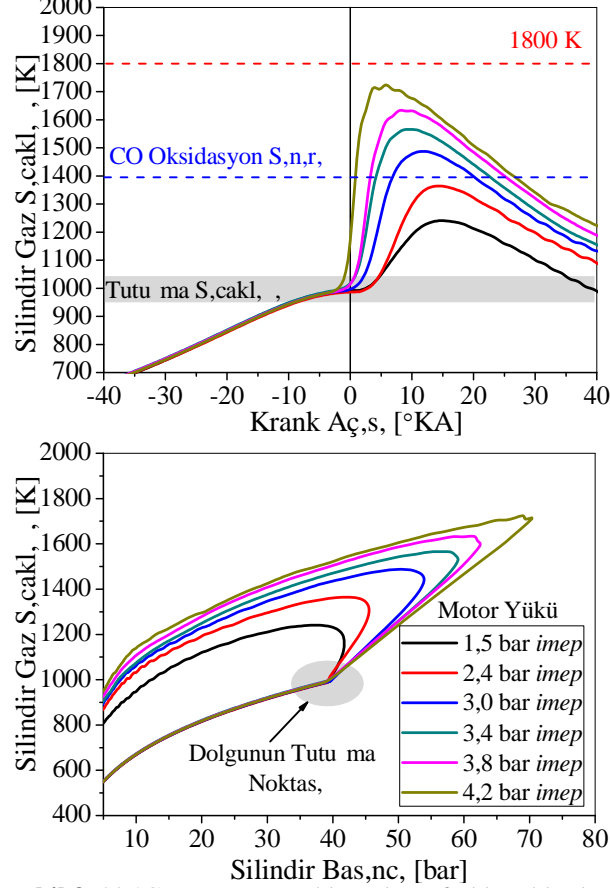
Tablo 2. Etanol yakıtının özellikleri

Yoğunluk @ 15 °C [g/cm ³]	0.8113
Dünya enerji değeri [MJ/kg]	24.21
Setan sayısı	5
Kinematik viskozite @ 40 [mm ² /s]	1.2235
Stokiyometrik hava/yakıt oranı	6.45
Parlama noktası, [°C]	13
Tutulma noktası, [°C]	464
Destilasyon [°C]	
İlk kaynama noktası	78
Son kaynama noktası	79

Deneyler Cussons P8160 deney düzeneğinde bulunan, maksimum 4000 d/dk'da 10 kW güç üretebilen DC elektrikli dinamometre ile yapılmıştır. Sıcaklık ölçümleri NiCr-Ni tipinde termokupullar ile yapılmıştır. Merriam marka laminar akış ölçer ile hava tüketimi ölçülmüştür. 2 kW gücünde PID kontrollü bir elektrikli sıkıştırıcı, ön karıştırıcı odası ve soğuk tankı arasında yerleştirilmiştir. Emme dolgu sıcaklığı, emme portunun 20 mm öncesine yerleştirilen termokupul ile ölçülmüştür. AVL 8QP500c model su soğutmalı, quartz basıncı sensörü ve Cussons P4110 model yanma analiz cihazı ile silindir içi basıncı ölçülmüştür. Elde edilen analog veriler National Instruments 6259 model veri aktarım kartı ile 0,36 KA aralığında dijital ortama kaydedilmiştir. Ortalama 50 çevrimin ortalaması alınarak silindir içi basıncı değerleri belirlenmiştir. Ortalama çevrimlerin destandartizasyonunu inceleyebilmek için *imep* ve maksimum silindir gaz basıncı (P_{maks}) için varyans destandartizasyon katsayısı (*COV*) hesaplanmıştır. Motorunda ağırlık, vuruş hızı, destandartizasyon silindir basıncı artıran oranının 10 bar/°KA olarak düzensiz çalışma durumu da COV_{imep} destandartizasyon için %10 olarak belirlenmiştir. Tek bölgesel yanma modeline göre Termodinamik 1. kanunun uygulanması ile sıkıştırma, yayılma oranı analizi yapılmıştır.

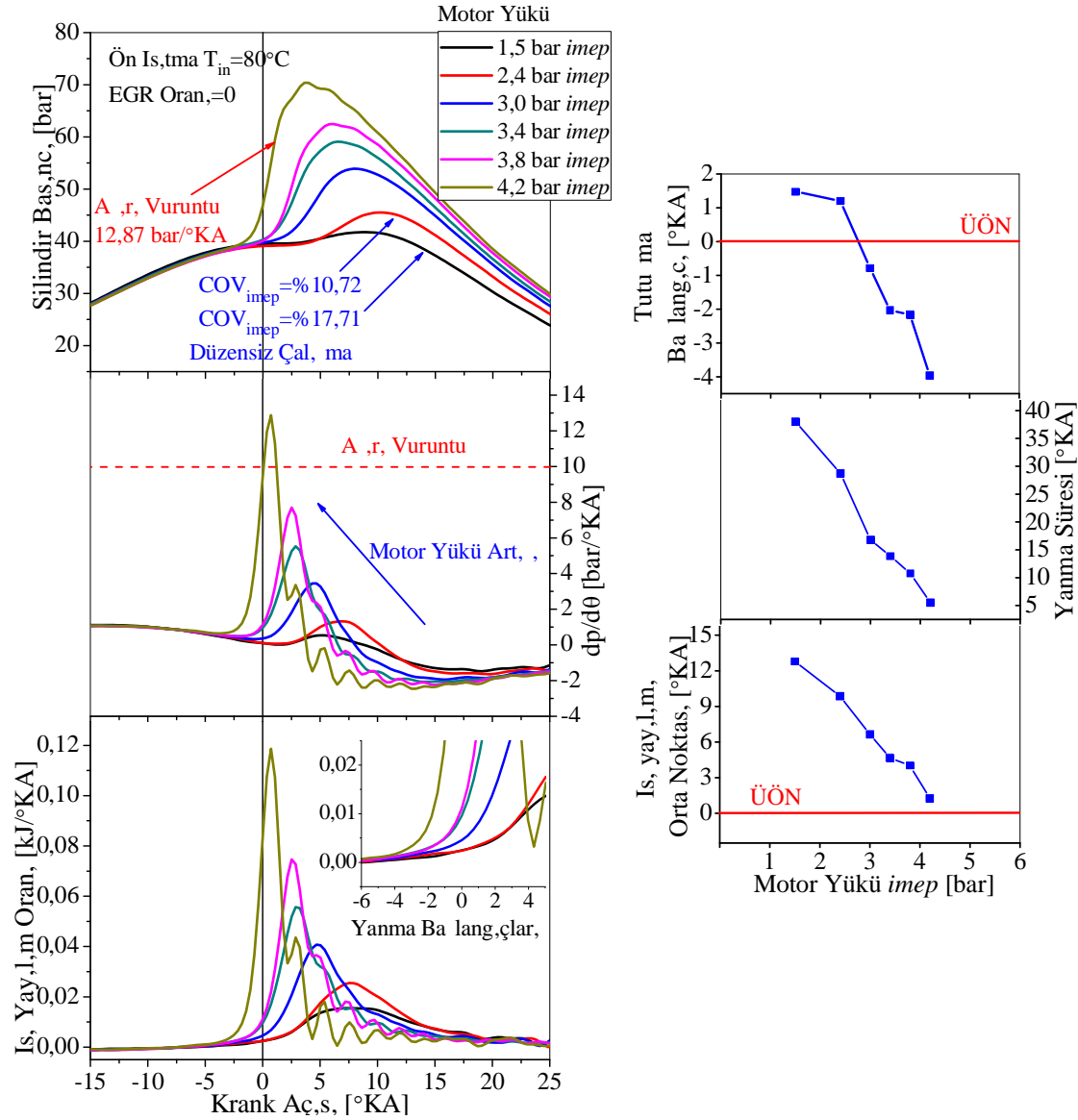
3. Motor Yük Art, ,n,n HCCI Yanma Karakteristi i Üzerine Etkileri

ekil 3'de s, k, t, rma sonu ve yanma ba lang, c, ndan hemen önceki konumda dolgu s, cakl, , gri bant ile gösterilmekte ve etanol için gerekli olan kendi kendine tutu ma s, cakl, , na minimum 80 °C ön , s, tma s, cakl, , ile ula , labildi i görülmektedir. Yine ekilde silindir bas, nc, na ba l, olarak silindir gaz s, cakl, klar, n, n de i imi üzerinde tutu ma ba lang, c, n, n meydana geldi i bölge görülmektedir. ilindir bas, nc, yakla , k olarak 40 bar ve s, cakl, k de erleri 980-1000 K civar, nda iken tutu ma meydana gelmekte ve bu noktadan sonra yanman, n etkisi ile silindir gaz s, cakl, , h, zla artmaktadır.



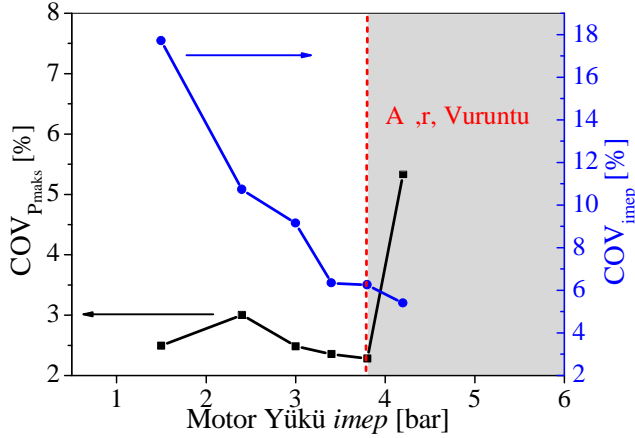
ekil 3. 80 °C ön , s, tma s, cakl, , nda ve farklı yüklerde silindir gaz s, cakl, , n, n de i imi

ekil 4'de Is, yay, l, m e rilerinin ba lang, çlar, na dikkat edilirse, tek a amal, tutu ma tutu ma gerçeikle mekte ve yüksek setan say, s, na sahip konvansiyonel distile yak, tlarda görülen dü ük s, cakl, k , s, yay, l, m, safhas, ile negatif s, cakl, k katsay, bölgesinin olu umu görülmemektedir [1]. Bu yüzden, etanol için gerekli olan minimum ön , s, tma s, cakl, , , setan say, s, yüksek yak, tlara göre daha yüksek olmas, gerekmektedir [1].



ekil 4. 80 °C ön ısıtma sıcaklığında ve farklı yüklerde yanma sonuçlarının detaylı imini

Sonuçlardan görüldüğü üzere, motor yükünün artması ile birlikte dolgunun emelilik oranı artmakta, kimyasal reaksiyona girme kabiliyeti (reaktivitesi) yükselmektedir. Bu durumda yanma daha erken krank açısı konumlarında başlamakta ve yanma oranının hızla artarak yanma daha kısa sürede gerçekleşerek vuruntu emeliliği artmaktadır. Motor yükü artması ile silindir basıncı ile maksimum yayılım oranı artarak ÜÖN'ya yaklaştırmaktadır. Maksimum silindir basıncı, 1,5 bar imep'de yaklaşık olarak 41 bar iken motor yükü 4,2 bar imep'e çıkarıldığında 70 bar derecesine kadar artmış göstermektedir. Krank açısı konumları ise 8,64 °KA'dan 3,96 °KA'na değişerek ÜÖN'ya doğru giderek yaklaşmaktadır. Motor yükü 4,2 bar imep'e yükseltildiğinde ise basınç oranı ($dp/d\theta$) 12,87 bar/°KA ile vuruntu sınırına oldukça üzerine çıkmaktadır. Motor yükü arttıkça COV_{imep} değerlerinde azalma olduğu ekil 5'de görülmektedir. COV_{Pmaks} değerinde fazla bir değişim görülmez iken, vuruntu oluşumu ile birlikte silindir basıncının değişiminde meydana gelen salınım neticesinde, maksimum silindir basıncının çevrimsel değişiminde ani artış olmaktadır.



ekil 5. 80 °C ön ,s,tma s,cakl, ,nda ve farklı yüklerde COV_{imep} ve COV_{Pmaks} de i imi

Is, yay,l,m e rilerinde görüldü ü gibi dü ük motor yüklerinde (1,5 bar ve 2,4 bar $imep$) silindir içersine al,nan dolgu oldukça fakir oldu undan, kararl, bir yanma tam olarak sa lanamam, ve ÜÖNødan çok daha sonra ba lam, t,r. Bu durumda, geni leme zaman,nda yanma devam etmekte ve silindir bas,nc, ve bas,nc art, oran,n,nda belirgin bir de i im gözlenememektedir. ekil 4øde görüldü ü üzere silindir gaz s,cakl,klar, azalmakta ve bu yüzden yanma verimi de dü mektedir. Bu çal, ma rejimlerinde COV_{imep} de erleri % 17,71 ve 10,72, olarak düzensiz çal, ma s,n,r,n,n çok üzerinde gerçekle mi tir. Bas,nc art, oranlar, (dP/d) da 1,176 ve 1,32 bar/°KA olarak gerçekle mi tir. HCCI yanmas,nda tutu ma tamamen kimyasal kinetik ile kontrol edildi i için yak,t kompozisyonundan, e de erlik oran,ndan ve dolgunun termodinamik durumundan etkilenmektedir. Motor yükü çok dü ük olan çal, ma rejimlerinde, ön kar, ,ml, homojen dolgu a ,r, fakir oldu u için reaktivitesi azalmakta ve tutu ma tam olarak sa lanamamaktadır. Yanma oran,n,nde i mesi, eksik yanma ya da tutu man,n baz, çevrimler için gerçekle ememesinden dolayı, homojenli in sa lanamamas, gibi durumlar,n sonucunda çevrimsel farklı,l,klar artmaktadır. Yüksek setan say,s,na sahip konvansiyonel distile yak,tlarda görülen dü ük s,cakl,k ,s, yay,l,m, ile ana yanma faz, ba lang,c, için gerekli olan silindir içi s,cakl,klara ula ,labilmektedir. Fakat tek a amal, tutu maya sahip etanol ile bu durum söz konusu olmad, ,ndan, dü ük motor yüklerinde EGR uygulamas, olmadan ön ,s,tma s,cakl, ,n,n 80 °Cømin üzerine ç,kar,lmas, gerekli olmaktadır.

3. Sonuçlar

Bu çal, mada, tek silindirli, direkt enjeksiyonlu (DI) bir dizel motorunda emme manifolduna (ön kar, ,m odas,na) port tipi yak,t enjeksiyonu ile etanol püskürtülerek homojen ön kar, ,ml, dolgu olu turulmu tur. 2200 d/dk motor h,z,nda, emme dolgusunun minimum 80 °C s,cakl, ,nda ön ,s,t,mas, ile motorda HCCI konumunda tutu ma sa lanabilmi tir. Motor yükü art, ,n,n yanmaya etkileri ara t,r,lm, ve a a ,daki sonuçlar elde edilmi tir.

- Motor yükü art, , ile birlikte dolgunun e de erlik oran, artt,kça, kimyasal reaksiyona girme kabiliyeti (reaktivitesi) yükselmekte ve yanma daha erken krank aç, konumlar,nda ba lamaktadır. Yanma oran,n,n h,z, artarak toplam yanma süresi a ,r, k,salmakta ve yanma ÜÖNø civar,nda gerçekle mektedir. Böylece vuruntu e ilimi artmaktadır. Motor yükü 4,2 bar $imep$ ø yükseltildi inde ise bas,nc art, oran, (dP/d) 12,87 bar/°KA ile vuruntu s,n,r,n,n üzerine ç,k,lmaktadır. Motor yükü artt,kça COV_{imep} de erlerinde azalma gerçekle mektedir. COV_{Pmaks} de erinde fazla bir de i im görülmez iken, vuruntu ba lang,c, ile birlikte ani olarak artmaktadır.
- Dü ük motor yüklerinde (1,5 bar ve 2,4 bar $imep$) dolgu oldukça fakir oldu undan eksik yanma ve tekleme gerçekle mektedir. Yanma ÜÖNødan sonra gerçekle ebilmi , silindir bas,nc, ve bas,nc art, oran,nda belirgin bir de i im gözlenememektedir. Bu yüklerde COV_{imep} de erleri % 17,71 ve 10,72, olarak düzensiz çal, ma s,n,r,n,n çok üzerinde gerçekle mi tir. Bu çal, ma rejiminde bas,nc art, oranlar, da (dP/d) 1,176 ve 1,32 bar/°KA olarak gerçekle mi tir.
- Elde edilen sonuçlara göre motorun HCCI konumunda çal, mas,ndaki üst s,n,rlar genellikle k,smi yük durumunda (dizel yanmas,na göre yar,m yükün alt,nda) olmaktadır. Motor yükü artt,kça, yanma ba lang,c, ve yanma oran,n,n kontrolü için ön ,s,tma s,cakl, ,na ba l, olarak EGR uygulamas,na ihtiyaç oldu u görülmektedir. Dü ük yüklerde ise EGR uygulamas, olmadan 80 °C üzerine ön ,s,tma s,cakl,na ihtiyaç oldu u görülmektedir.

Te ekkür

Bu çal, ma, Tübitak destekli 108M228 kodlu proje kapsam,nda yap,lm, t,r. Yazarlar katk,lar,ndan dolay, Tübitak'a te ekkür eder.

5. Kaynaklar

1. Sjöberg, M., Dec, J. E., Effects of EGR and its constituents on HCCI autoignition of etanol, *Proceedings of the Combustion Institute*, 33, 3031-38, (2011).
2. Jacobs, T.J., Assanis, D.N., "The attainment of premixed compression ignition low-temperature combustion in a compression ignition direct injection engine", *Proceedings of the Combustion Institute*, Cilt 31, 2913-2920, 2007.
3. Tree, D.R., Svensson K.I., "Soot processes in compression ignition engines", *Progress in Energy and Combustion Science*, Cilt 33, 272- 309, 2007.
4. Kim, D.S., Kim, M.Y, Lee, C.S., "Reduction of Nitric Oxides and Soot by Premixed Fuel in Partial HCCI Engine", *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Cilt 128, 497-505, 2006.
5. Sher, E., 1998, "Handbook of Air Pollution From Internal Combustion Engines: Pollutant Information and Control" Academic Press, 288-300.
6. Ma, J., Lü, X-C., Ji, L., Huang, Z., "An experimental study of HCCI-DI combustion and emissions in a diesel engine with dual fuel", *International Journal of Thermal Sciences*, 47 (9): 1235-1242 (2008).
7. 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, 1169-80, (2011).
8. Zhang, Y., He, B.Q., Xie, H. and Zhao H., "The Combustion and Emission Characteristics of Ethanol on a Port Fuel Injection HCCI Engine", *SAE*, SAE Paper No: 2006-01-0631
9. Siebers, D. L., Edwards, C. F., Autoignition of Methanol and Ethanol Sprays under Diesel Engine Conditions, *SAE*, Paper No: 870588, (1987).