

PAPER DETAILS

TITLE: PORT TIPI ETANOL YAKIT ENJEKSİYONLU HCCI MOTORUNDA MOTOR YÜK
DEĞİŞİMİNİN YANMA KARAKTERİSTİĞİNE ETKİSİ

AUTHORS: Ozer CAN,H Serdar YÜCESU,Can ÇINAR,S Ayhan BAYDIR,Fatih SAHİN,Erkan
ÖZTÜRK

PAGES: 34-40

ORIGINAL PDF URL: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/303209>

PORT TİPİ ETANOL YAKIT ENJEKSİYONLU HCCI MOTORUNDA MOTOR YÜK DEĞİLİMİNİN YANMA KARAKTERİSTİKİNE ETKİSİ

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

^a Gazi Üniv., Teknoloji Fak., Otomotiv Müh. Bölümü, Ankara, Türkiye

^b Afyon Kocatepe Üniv., Teknik Ekt., Fak., Otomotiv A.B.D., Afyon, Türkiye

^c Pamukkale Üniv., Teknik Ekt., 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 oktan sayısına sahip etanol yakıt ile motor yükü değişiminin (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 girişi sıcaklığı ile HCCI yanma konumunda tutulma sağlanabilmektedir. Düşük yüklerde (1,5 bar ve 2,4 bar *imep*) eksik yanma ya da tekleme meydana gelmekte ve COV_{imep} değerleri düzensiz çalışma sınırlarının üzerinde kalmaktadır. Bu nedenle, düşük yüklerde 80 °C üzerine ön ısıtma sıcaklıkları gerekli olmaktadır. Yük artışı ile birlikte 4,2 bar *imep*de alev vuruntu sınırlarının üzerine çıkmaktadır. Yüksek yüklerde, yanma başlangıcı ve yanma oranının kontrolü için, ön ısıtma sıcaklığına bağlı olarak EGR uygulaması gerekli olmaktadır.

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

* Yazımacı 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

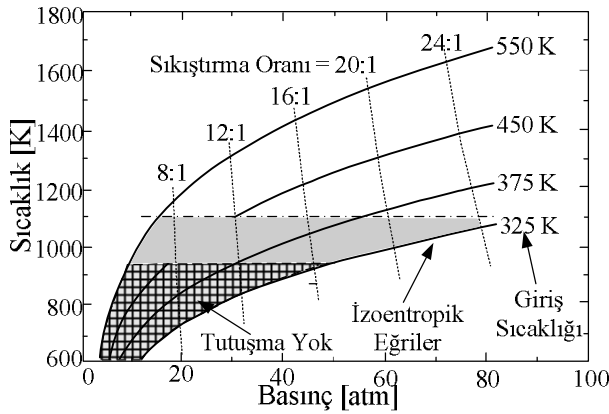
Homojen dolgu sıkıştırma ile ateşlemeli motorlar (HCCI), çok düşük NO_x ve PM emisyonlarıyla DI Dizel motorlara kadar yüksek termik verime ulaşabilmektedirler [1]. Bu yüzden, buji ile ateşlemeli motorlarda termik verim ile yakıt tüketiminin iyileştirilebilmesi, dizel motorlarda ise egzoz sonrası uygulamaların gerekliliğinin ortadan kaldırabilmesi amacıyla, HCCI yanma kavramının alternatif olarak uygulanması gelecek vaat etmektedir [1]. Silindir dışarısında ya da silindir içerisinde homojen ve seyreltilmiş olarak hava/yakıt karışımı hazırlanmakta, homojen dolgu veya emme havası herhangi bir kışmaya mazur kalmadan silindir içerisine alınmaktadır. Hazırlanan homojen ve fakir dolgunun sıkıştırma zamanı sonunda belli bir sıcaklığa erişmesi ile yanma odasının birçok yerinde el zamanlı olarak kendi kendine tutulma başlamaktadır. Homojen ve fakir dolgunun el 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 oluşturan en temel durum; tutulma başlangıcının tamamen kimyasal kinetik ile gerçekleşmesidir. Yanma başlangıcından önce, yakıt kompozisyonu, eldeğerlik oranı ya da motor yüküne bağlı olarak termodinamik özelliklerin (dolgu sıcaklığı gibi) kimyasal kinetik için gerekli olan şartlarla yüksek

oranda tekrarlanabilirlik ile elâmesi gerekmektedir [7]. Deneysel çâlmalarda HCCI çâma konumunda yanmanın oluturulabilmesi için, motorun önceden belirli bir hâzda çâltâarak ön âma ve/veya EGR uygulamasıyla uygun ön koulların daha kararlı bir âkilde saklanabilmesi gerekli olmaktadır.

Port tipi yakâ enjeksiyon sistemi ile silindirdâ homojen karâân telâilinde kullanâcak yakâların uygun viskoziteye, dâlık kaynama noktasâna ve uçuculuâa sahip olmasâ gerekmektedir. Aksi durumlarda, manifold duvarlarında yakâ filmi olulumu meydana gelebilmekte ve böylece her bir çevrimde silindire alânan dolgu miktarânda deâilim ortaya çâkâbilmektedir. Bu durum, motorun çâltâmasânda çevrimden çevrime farklıâkların artmasâna yol açabilmektedir. Silindir duvarlarında âlanma meydana geldikinde ise yüksek HC olulumuna neden olmaktadır. Yenilenebilir yakâlardan etanolün destilasyon karakteristiâi incelendiğinde, ilk kaynama noktasâ diâer konvansiyonel yakâlara göre oldukça dâlık sâcâklâta (~78 °C) baâlamaktadır. Dizel yakâlarâ için ilk kaynama noktasâ için yaklaâk 180-190 °C sâcâklââ aralââna ulaâmasâ gerekmektedir. Bu nedenle port tipi yakâ enjeksiyonlu bir sistemde, sââââma zamanâ baâlangâânda etanol kolayca buharlaâabilmekte ve ön karâânlâ homojen dolgu saklanabilmektedir. Etanolün buharlaâma gizli âââ oldukça yüksek olmakla birlikte, mükemmel fakir yanma özelliâine sahiptir. Fakat dâlık enerji yokunluâuna ve dâlık setan sayââna sahip olduâundan dizel motor çâltâma koullarânda kullanâmâzor olmaktadır [8].

Farklâ âldeâerlik oranlarında etanolün kendi kendine tutulma sâcâklââ yaklaâk olarak 930-1050 K arasânda deâilim göstermektedir [1, 9]. CHEMKIN ile yapâan bir modelleme çâltâmasânda ise yaklaâk olarak 960 K sâcâklââna kadar etanolün kararlı halde reaksiyonlara katâmadââ belirlenmiâtir [1, 9]. Bu nedenle, sââââma sonunda bahsedilen bu sâcâklâk aralââna ulaâabilmek için, ön karâânlâ homojen dolgunun giriâ sâcâklââân arttâmasâgerekli olmaktadır. âkil 1âde dizel çâltâma konumuna benzer koullarda etanol yakââ ile yapâan bomba deneylerinin sonuçlarâ görâlmektedir [9].



âkil 1. Etanol yakâân Dizel motor koullarânda kendi kendine tutulma yeteneâi [7]

âkilde farklı dolgu giriâ sâcâklâklarânda elde edilen izoentropik eâriler üzerinde sââââma oranlarâna baâkâ olarak silindir gaz sâcâklâklarâân deâilimi görâlmektedir. 18:1 sââââma oranâna sahip atmosferik bir motorda, piston ÜÖNâda iken dolgu sâcâklââân minimum tutulabilme sâââ olarak (~ 950 K) âkilde görâlen tarâlâ bölgenin üzerinde ve eksen çizgisi ile gösterilen 1100 K arasândaki bir sâcâklâk deâerine ulaâabilmek için, ön âma sâcâklââân yaklaâk olarak, en az ~ 80 °C civarânda olmasâgerekli görâlmektedir.

Bu çâltâmada, minimum emme dolusu giriâ sâcâklââ ile 18:1 sââââma oranâna sahip bir dizel motorunda HCCI yanmasâân saklanabilmesi amaâlanmââtir. İlk olarak dizel çâltâma konumunda istenilen motor hââna (2200 d/dk) ulaâââktan sonra, ön karâânlâ etanol enjeksiyonunun arttâmasâ ile dizel yakâ enjeksiyonu kademeli olarak azaltâarak deney motoru HCCI yanma konumunda çâltâmmââtir. Yapâan ön denemeler doârultusunda, minimum 80 °C ön âma sâcâklââânda hazârlanan ön karâânlâ homojen dolgunun tutulmasâ saklanabilmiâ ve deneylere baâlanmââtir. Motor yük artââân çevrimsel farklara, vuruntu eâilimine ve yanma karakteristiâine etkileri araâââmmââtir.

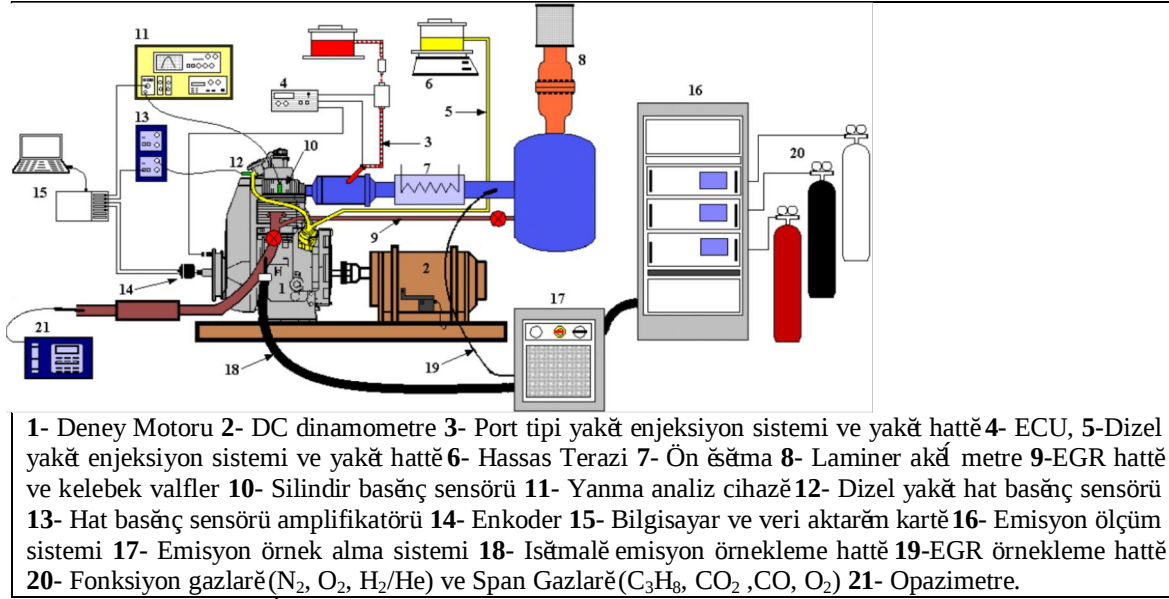
2. Deney Düzenekâi

Deneysel çâltâmalarda tek silindirli, dört zamanlâ direkt enjeksiyonlu bir dizel motor kullanâmmââtir. Deney motorunun teknik özellikleri Tablo 1âde verilmiâtir. âkil 2âde deney düzenekâinin âematik âekli görâlmektedir. Homojen ön karâânlâ dolgunun oluturulmasâ ve manifold duvarlarında yakâ filmi olulumuna engel olabilmek için ön karâân odasâ (emme manifoldu) yaklaâk 3,5 L hacminde imal edilmiâtir. Dâlık basâçlâ port tipi yakâ enjeksiyon sistemi ön karâân odasâna adapte edilmiâtir. Yakâ enjektörü emme portunun

yaklaşık 200 mm ötesine yerleştirilmiş ve elektronik kontrol ünitesi ile enjeksiyon süresi kontrol edilmiştir. Ön karışım yakıtı 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 sisteminin şematik görünümü

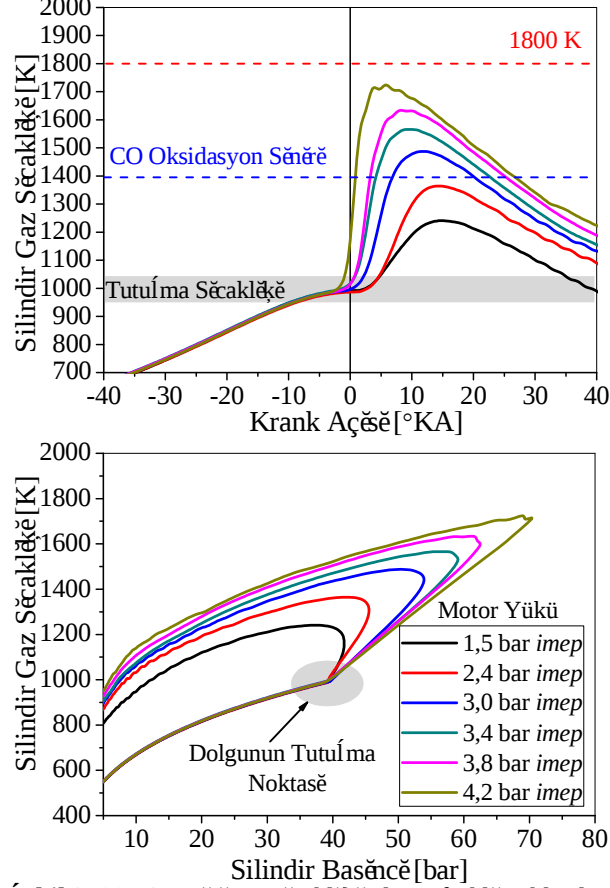
Tablo2. Etanol yakıtının özellikleri

Yoğunluk @ 15 °C [g/cm ³]	0.8113
Düğük ısı 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 nok.	78
Son kaynama nok.	79

Deneyler Cussons P8160 deney düzeneğinde bulunan, maksimum 4000 d/d'da 10 kW güç üretebilen DC elektrikli dinamometre ile yapılmıştır. Sıcaklık ölçümleri NiCr-Ni tipinde termokupllar ile yapılmıştır. Merriam marka laminar akış ölçer ile hava tüketimi ölçülmüştür. 2 kW gücünde PID kontrollü bir elektrikli ısıtıcı ön karışım odası ve lık tankı arasında yerleştirilmiştir. Emme dolgu sıcaklığı emme portunun 20 mm öncesine yerleştirilen termokupl ile ölçülmüştür. AVL 8QP500c model su soğutmalı quartz basınç sensörü ve Cussons P4110 model yanma analiz cihazı ile silindir içi basınç ölçülmüştür. Elde edilen analog veriler National Instruments 6259 model veri aktarım kartı ile 0,36 KA aralığında dijital ortama kaydedilmiştir. Ardışık 50 çevrimin ortalaması alınarak silindir içi basınç değerleri belirlenmiştir. Ardışık çevrimlerin dekilimlerini inceleyebilmek için $imep$ ve maksimum silindir gaz basıncı (P_{maks}) için varyans dekilim katsayısı (COV) hesaplanmıştır. Motorda alışıla gelen sürat değeri silindir basınç artış oranının 10 bar/°KA olarak, düzensiz çalışma durumu da COV_{imep} değeri için %10 olarak belirlenmiştir. Tek bölgesi yanma modeline göre Termodinamiğin 1. kanunun uygulanması ile ısı yayılım oranı analizi yapılmıştır.

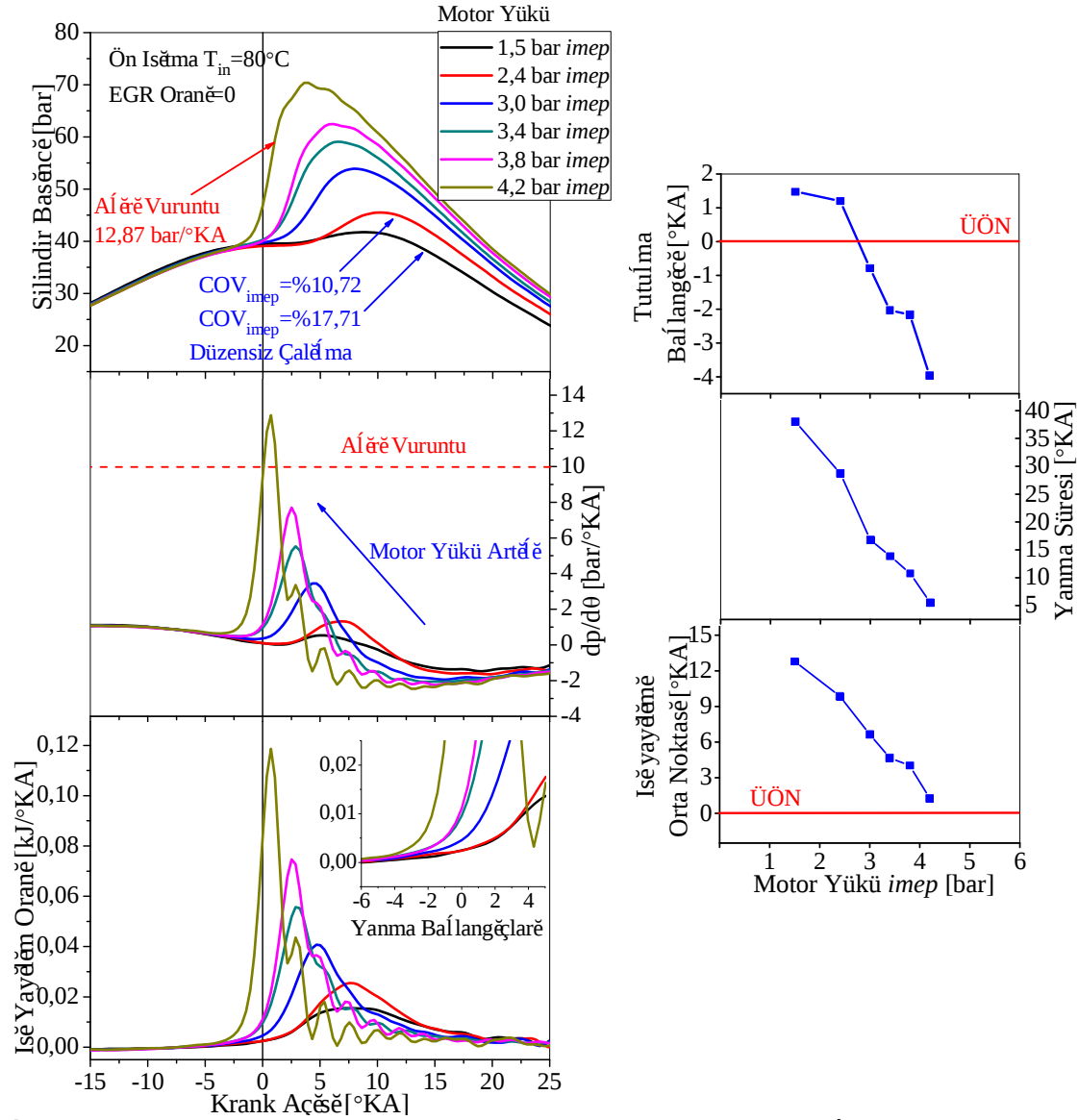
3. Motor Yük Artışının HCCI Yanma Karakteristiği Üzerine Etkileri

Şekil 3'de sızdırma sonu ve yanma bağılangıcından hemen önceki konumda dolgu sıcaklığı gri bant ile gösterilmekte ve etanol için gerekli olan kendi kendine tutulma sıcaklığına minimum 80 °C ön ısıtma sıcaklığı ile ulaşabildiği görülmektedir. Yine Şekilde silindir basıncına bağlı olarak silindir gaz sıcaklıklarının değişimi üzerinde tutulma bağılangıcının meydana geldiği bölge görülmektedir. Silindir basıncı yaklaşık olarak 40 bar ve sıcaklık değerleri 980-1000 K civarında iken tutulma meydana gelmekte ve bu noktadan sonra yanmanın etkisi ile silindir gaz sıcaklığı hızla artmaktadır.



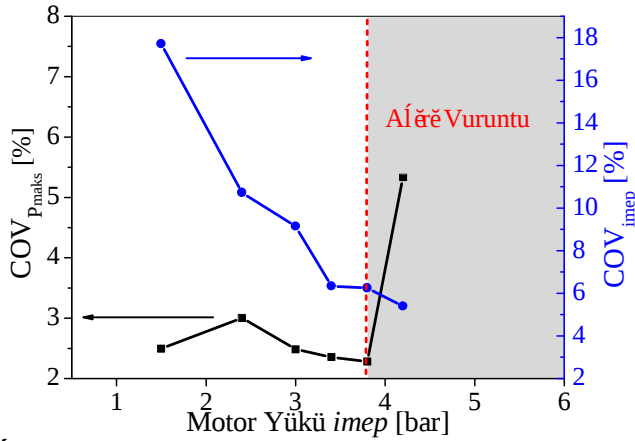
Şekil 3. 80 °C ön ısıtma sıcaklığında ve farklı yüklerde silindir gaz sıcaklığının değişimi

Şekil 4'de Isı yayılım eğrilerinin bağılangıçlarına dikkat edilirse, tek aamalı tutulma tutulma gerçekleşmekte ve yüksek setan sayısına sahip konvansiyonel distile yakıtlarda görülen düşük sıcaklık ısı yayılımı safhası ile negatif sıcaklık katsayı bölgesinin oluşumu görülmemektedir [1]. Bu yüzden, etanol için gerekli olan minimum ön ısıtma sıcaklığı setan sayısı yüksek yakıtlara göre daha yüksek olması gerekmektedir [1].



Şekil 4. 80 °C ön ıtma sıcaklığında ve farklı yüklerde yanma sonuçlarının değıli

Sonuçlardan görüldüğü üzere, motor yükünün artışı ile birlikte dolgunun eldeğerlik oranı arttıkça, kimyasal reaksiyona girme kabiliyeti (reaktivitesi) yükselmektedir. Bu durumda yanma daha erken krank aç konumlarında başlamakta ve yanma oranının hızla artarak yanma daha kısa sürede gerçekleştirilerek vuruntu eğilimi artmaktadır. Motor yükü artışı ile silindir basıncı ile maksimum ısı yayılım oranı artarak ÜÖNöya yaklaşmaktadır. Maksimum silindir basıncı 1,5 bar imep'de yaklaşık olarak 41 bar iken motor yükü 4,2 bar imep'e çıkarıldığında 70 bar değerine kadar artış göstermektedir. Krank aç konumları ise 8,64 °KA'dan 3,96 °KA'na değılierek ÜÖNöya doğru giderek yaklaşmıştır. Motor yükü 4,2 bar imep'e yükseltildiğinde ise basıncı artışı oranı ($dp/d\theta$) 12,87 bar/°KA ile vuruntu sınırının oldukça üzerine çekilmektedir. Motor yükü arttıkça COV_{imep} değerlerinde azalma olduğu Şekil 5'de görülmektedir. COV_{Pmaks} değerinde fazla bir değılim görülmez iken, vuruntu oluşumu ile birlikte silindir basıncının değıliminde meydana gelen salınımın neticesinde, maksimum silindir basıncının çevrimsel değıliminde ani artış olmaktadır.



Ėekil 5. 80 °C ön ĖĖama ŖĖacıkĖĖında ve farklı y¼klerde COV_{imep} ve COV_{pmax} değilimi

İĖĖ yayĖĖm eğrilerinde g¼r¼ld¼Ė¼ gibi d¼Ė¼k motor y¼klerinde (1,5 bar ve 2,4 bar imep) silindir iÇerisine alĖnan dolgu oldukĖa fakir olduk¼ndan, kararlı bir yanma tam olarak ŖaklanamamĖ ve ÜÖN¼dan Ėok daha sonra baėlamĖĖtĖ. Bu durumda, geniğleme zamanĖnda yanma devam etmekte ve silindir basıncĖ ve basıncĖ artĖ oranĖnda belirgin bir değilim g¼zlenememektedir. Ėekil 4¼de g¼r¼ld¼Ė¼ üzere silindir gaz ŖĖacıkĖĖlarĖ azalmakta ve bu y¼zden yanma verimi de d¼Ėlmektedir. Bu ĖalıĖma rejimlerinde COV_{imep} değerleri % 17,71 ve 10,72, olarak d¼zensiz ĖalıĖma ŖĖĖĖĖĖĖ¼ Ėok Ŗzerinde gerĖekleėmiėtir. BasıncĖ artĖ oranlarĖ (dP/d'') da 1,176 ve 1,32 bar/°KA olarak gerĖekleėmiėtir. HCCI yanmasĖnda tutulma tamamen kimyasal kinetik ile kontrol edildiği iÇin yakĖ kompozisyonundan, eldeğerlik oranĖndan ve dolgunun termodinamik durumundan etkilenmektedir. Motor y¼k¼ Ėok d¼Ė¼k olan ĖalıĖma rejimlerinde, ön karĖĖĖĖĖ¼ homojen dolgu alĖĖĖ fakir olduğu iÇin reaktivitesi azalmakta ve tutulma tam olarak Ŗaklanamamaktadır. Yanma oranĖnĖ değilmesi, eksik yanma ya da tutulmanın bazı Ėevrimler iÇin gerĖekleememesinden dolayı homojenliğin ŖaklanamamasĖ gibi durumların sonucunda Ėevrimsel farklılıklar artmaktadır. Y¼ksek setan sayĖına sahip konvansiyonel distile yakĖlarda g¼r¼len d¼Ė¼k ŖĖacıkĖĖ ĖĖ yayĖĖmĖ ile ana yanma fazĖ baėlangĖĖ iÇin gerekli olan silindir iÇi ŖĖacıkĖĖlara ulağılabilmektedir. Fakat tek alĖmalĖ tutulmaya sahip etanol ile bu durum Ŗ¼z konusu olmadığından, d¼Ė¼k motor y¼klerinde EGR uygulamasĖ olmadan ön ĖĖama ŖĖacıkĖĖĖn 80 °C¼n Ŗzerine ĖĖakarĖmasĖ gerekli olmaktadır.

3. Sonuğlar

Bu ĖalıĖmada, tek silindirli, direkt enjeksiyonlu (DI) bir dizel motorunda emme manifolduna (ön karĖĖĖ odasına) port tipi yakĖ enjeksiyonu ile etanol p¼sk¼rt¼lerek homojen ön karĖĖĖĖĖ¼ dolgu oluğturulmuğtur. 2200 d/dk motor hĖzĖnda, emme dolgusunun minimum 80 °C ŖĖacıkĖĖĖnda ön ĖĖĖmasĖ ile motorda HCCI konumunda tutulma ŖaklanabilmĖtir. Motor y¼k¼ artĖĖĖĖ¼ yanmaya etkileri araėtĖĖmĖ ve alĖĖĖdaki sonuğlar elde edilmiğtir.

- Motor y¼k¼ artĖĖĖ¼ ile birlikte dolgunun eldeğerlik oranĖ arttıkĖa, kimyasal reaksiyona girme kabiliyeti (reaktivitesi) y¼kselmekte ve yanma daha erken krank aĖĖ konumlarında bağlamaktadır. Yanma oranĖnĖ hĖzĖ artarak toplam yanma s¼resi alĖĖĖĖalmakta ve yanma ÜÖN¼ civarĖnda gerĖekleėmektedir. B¼ylece vuruntu eğilimi artmaktadır. Motor y¼k¼ 4,2 bar imep¼e y¼kseltildiėinde ise basıncĖ artĖ oranĖ (dP/d'') 12,87 bar/°KA ile vuruntu ŖĖĖĖĖ¼ Ŗzerine ĖĖĖmaktadır. Motor y¼k¼ arttıkĖa COV_{imep} değerlerinde azalma gerĖekleėmektedir. COV_{pmax} değerinde fazla bir değilim g¼r¼lmez iken, vuruntu baėlangĖĖ ile birlikte ani olarak artmaktadır.
- D¼Ė¼k motor y¼klerinde (1,5 bar ve 2,4 bar imep) dolgu oldukĖa fakir olduk¼ndan eksik yanma ve tekleme gerĖekleėmektedir. Yanma ÜÖN¼dan sonra gerĖekleėebilmiė, silindir basıncĖ ve basıncĖ artĖ oranĖnda belirgin bir değilim g¼zlenememektedir. Bu y¼klerde COV_{imep} değerleri % 17,71 ve 10,72, olarak d¼zensiz ĖalıĖma ŖĖĖĖĖĖ¼ Ėok Ŗzerinde gerĖekleėmiėtir. Bu ĖalıĖma rejiminde basıncĖ artĖ oranlarĖda (dP/d'') 1,176 ve 1,32 bar/°KA olarak gerĖekleėmiėtir.
- Elde edilen sonuğlara g¼re motorun HCCI konumunda ĖalıĖmasĖndaki Ŗst ŖĖĖlar genellikle kĖmi y¼k durumunda (dizel yanmasĖna g¼re yarĖn y¼k¼n altĖnda) olmaktadır. Motor y¼k¼ arttıkĖa, yanma baėlangĖĖ ve yanma oranĖnĖ kontrol¼ iÇin ön ĖĖama ŖĖacıkĖĖĖa bağlı olarak EGR uygulamasına ihtiyağ olduğu g¼r¼lmektedir. D¼Ė¼k y¼klerde ise EGR uygulamasĖ olmadan 80 °C Ŗzerine ön ĖĖama ŖĖacıkĖĖına ihtiyağ olduğu g¼r¼lmektedir.

Tefekkür

Bu çalışma, Tübitak destekli 108M228 kodlu proje kapsamında yapılmıştır. Yazarlar katkılarından dolayı Tübitak'a tefekkür 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 emissions 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).