

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DIESEL MOTORLARDA EMME HAVASININ
NEMLENDİRİLMESİYLE NO_x EMİSYONUNUN
AZALTILMASI ve NEMLENDİRME İÇİN TÜKETİLEN
ENERJİ ile EGZOZ ENERJİSİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

Makine Müh. Emrah BÖLÜK

**FBE Makina Mühendisliği Anabilimdalı Enerji Makinaları Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Yrd.Doç. Dr. Muammer ÖZKAN

İSTANBUL, 2006

İÇİNDEKİLER

| | Sayfa |
|--|-------|
| SİMGE LİSTESİ | iv |
| KISALTMA LİSTESİ..... | vi |
| ŞEKİL LİSTESİ..... | vii |
| ÇİZELGE LİSTESİ | viii |
| ÖNSÖZ | ix |
| ÖZET | x |
| ABSTRACT | xi |
| 1 GİRİŞ | 1 |
| 2 DIESEL MOTORLARINDA NO _x KONTROL STRATEJİLERİ..... | 3 |
| 2.1 Birincil Kontrol Stratejileri | 3 |
| 2.1.1 Yakıt Enjeksiyon Parametreleri..... | 3 |
| 2.1.1.1 Enjeksiyon Zamanı ve Miktar Ayarı | 3 |
| 2.1.1.2 Enjeksiyon Basıncı | 4 |
| 2.1.2 Yakıt Kompozisyonu | 4 |
| 2.1.2.1 Ultra Düşük Azotlu Yakıtların Kullanımı..... | 5 |
| 2.1.3 Emme Oksidant Modifikasyonu..... | 5 |
| 2.1.3.1 EGR Kullanımı..... | 5 |
| 2.2 İkincil KontrolStratejileri..... | 7 |
| 2.2.1 Yanma Odası Tasarımı | 7 |
| 2.2.2 Emme Manifoltu ve Emme Kanalı Tasarımı | 7 |
| 2.2.3 Silindir İçersine Su İlavesi | 8 |
| 2.2.4 HCCI..... | 8 |
| 2.3 Üçüncül KontrolStratejileri..... | 9 |
| 2.3.1 SCR..... | 9 |
| 2.3.2 Lean-NO _x Katalistleri | 10 |
| 2.3.3 Elektro Katalistler..... | 10 |
| 2.3.4 Plazma Destekli Katalitik Redüksiyon | 11 |
| 2.3.5 Lean-NO _x Kapanları | 11 |
| 2.4 NO _x Kontrol Stratejilerinin Avantaj ve Dezavantajları | 13 |
| 3 DIESEL MOTORLARINDA EGZOZ EMİSYONLARININ AZALTILMASI AMACIYLA YANMA ODASINA SU İLAVESİ KONUSUNDAKİ ÇALIŞMALAR..... | 15 |
| 3.1 Enjeksiyon Yöntemi ile Yanma Odasına Su Gönderilmesi | 15 |

| | | |
|---------|--|----|
| 3.2 | Yakıt + Su Emülsiyon Tekniği ile Yanma Odasına Su Gönderilmesi | 16 |
| 3.3 | Emme Havası + Su Kombine Tekniği | 17 |
| 3.4 | Emme Havaşının Nemlendirilmesi Yöntemi | 18 |
| 4 | KULLANILAN YÖNTEM VE MATERYALLER | 19 |
| 4.1 | Yöntem..... | 19 |
| 4.1.1 | Silindir İçersine Buhar Fazında Su Gönderilmesinin Etkisinin Araşırılması | 19 |
| 4.1.1.1 | Isı Analizi..... | 19 |
| 4.1.2 | Buharlaştırma Enerjisinin Egzoz Gazlarından Karşılabilirliğinin Araşırılması | 21 |
| 4.1.2.1 | Nemlendirme İçin Gerekli Isı..... | 21 |
| 4.1.2.2 | Egzoz Gazları ile Motordan Yayılan Isının Hesaplanması | 22 |
| 4.2 | Materyaller | 23 |
| 4.2.1 | Buhar Üreteci | 23 |
| 4.2.2 | Deney Motoru..... | 25 |
| 4.2.3 | Hassasiyet ve Kalibrasyon Yöntemi..... | 26 |
| 4.2.4 | Deney Düzenegi | 26 |
| 4.3 | Deneyisel Çalışma | 27 |
| 4.3.1 | Çalışma Noktaları ve Ölçüm Sonuçları | 28 |
| 5 | SONUÇLAR ve ÖNERİLER..... | 32 |
| | KAYNAKLAR..... | 34 |
| | EKLER..... | 36 |
| Ek 1 | Buhar Üreteci Şeması..... | 36 |
| | ÖZGEÇMİŞ..... | 37 |

SİMGE LİSTESİ

| | |
|--|--|
| CO | Karbonmonoksit |
| CO_2 | Karbondioksit |
| $CO(NH_2)_2$ | Üre |
| c_p | Sabit basınçtaki özgül ısı |
| h_{fg} | Özgül buharlaşma ısısı |
| H_2 | Hidrojen molekülü |
| $H_{w,m}$ | Yanan dolgunun ısısı |
| HC | Hidrokarbon |
| H_2O | Su |
| k | Su ilave katsayısı |
| M_2 | Yanma ürünlerinin miktarı |
| M_{CO_2,H_2O,N_2,O_2} | Yanma ürünlerini oluşturan gaz moleküllerinin miktarları |
| m_{egzoz} | Egzoz debisi |
| m_{su} | Buharlaştırılacak su debisi |
| m_{hava} | Emme havasının debisi |
| $(mc'_v)_{t_0}^{t_m}$ | Sıkıştırma sonundaki ortalama molar özgül ısı |
| $(mc''_v)_{t_0}^{t_z}$ | Yanma ürünlerinin ortalama molar özgül ısı |
| $(mc''_{v_{H_2O,CO_2,O_2,N_2}})_{t_0}^{t_z}$ | Sabit hacimdeki gazların ortalama molar ısı kapasitesi formülü |
| N_2 | Azot molekülü |
| NH_3 | Amonyak |
| NO | Nitrik oksit |
| N_2O | Diazotoksit |
| NO_2 | Azot peroksit |
| NO_3 | Nitrat |
| O_2 | Oksijen molekülü |
| O^{-2} | Oksijen iyonu |
| P_{me} | Ortalama efektif basınç |
| Pt | Platinyum |
| Q | Isı |
| Q_{egzoz} | Egzoz gazlarından yayılan ısı |

| | |
|---------------|--|
| $Q_{duyulur}$ | Duyulur ısı |
| Q_{gizli} | Gizli ısı |
| SO_2 | Kükürt dioksit |
| t | Sıcaklık |
| t_{egzoz} | Egzoz sıcaklığı |
| $t_{kaynama}$ | Kaynama sıcaklığı |
| t_m | Sıkıştırma sonundaki sıcaklık |
| t_{ortam} | Ortam sıcaklığı |
| t_z | Görünen yanma sonu sıcaklık |
| Δt | Sıcaklık farkı |
| w | Özgül nem |
| Δw | Özgül nem farkı |
| μ | Yanan dolgunun moleküler değişim katsayısı |
| ξ_z | Isıl yararlanma katsayısı |
| ϕ | Bağıl nem |
| 1 | Giriş |
| 2 | Boğaz |
| λ | Hava fazlalık katsayısı |
| λ_1 | Basınç artış değeri |

KISALTMA LİSTESİ

| | |
|------|--|
| CFD | Computational Fluid Dynamics |
| DBT | Dry Bulb Temperature |
| DI | Direct Injection |
| DME | Di Metil Eter |
| EGR | Exhaust Gas Recirculation |
| EKD | Elektronik kontrollü Diesel |
| EKÜ | Elektronik Kontrol Ünitesi |
| EPA | Environmental Protection Agency |
| HC | Hidrokarbon |
| HCCI | Homogeneous Charge Compression Injection |
| HEI | Health Effects Institute |
| HFK | Hava Fazlalık Katsayısı |
| IARC | International Agency for Research on Cancer |
| IDI | In-Direct Injection |
| KMA | Krank Mili Açısı |
| MECA | Manufacturers of Emission Controls Association |
| NSCR | Non-Selective Catalytic Reduction |
| O.p. | Çalışma noktası |
| ÖYT | Özgül Yakıt Tüketimi |
| PM | Particulate Matter |
| SCR | Selective Catalytic Reduction |
| SFC | Specific Fuel Consumption |
| VOC | Volatile Organic Compound |
| WHO | World Health Organization |

ŞEKİL LİSTESİ

| | Sayfa |
|---|-------|
| Şekil 2.1 EGR sistemi | 6 |
| Şekil 2.2 SCR prensip şeması..... | 9 |
| Şekil 2.3 Zeolit yapıdaki lean-NO _x katalisti..... | 10 |
| Şekil 2.4 Plazma-destekli katalitik redüksiyon teknolojisi | 11 |
| Şekil 2.5 Lean-NO _x kapan teknolojisi..... | 12 |
| Şekil 4.1 Nemlendirme etkisi ile silindir içi maksimum sıcaklıkların değişimi..... | 20 |
| Şekil 4.2 Emme havasının nemlendirilmesi | 21 |
| Şekil 4.3 Buhar jeneratörü (üretici), üstten görünüşü | 24 |
| Şekil 4.4 Buhar jeneratörü (üretici) yandan görünüşü | 25 |
| Şekil 4.5 Deney düzeneğinin şematik şekli..... | 26 |
| Şekil 4.6 Deney düzeneği kontrol paneli | 27 |
| Şekil 4.7 Motor haritası ve çalışma yapılan noktalar..... | 28 |
| Şekil 4.8 Emme havasının nemlendirilmesinin motor momentine etkisi | 29 |
| Şekil 4.9 Emme havasının nemlendirilmesinin motor gücüne etkisi..... | 29 |
| Şekil 4.10 Emme havasının nemlendirilmesinin özgül yakıt tüketimine etkisi | 30 |
| Şekil 4.11 Emme havasının nemlendirilmesinin NO _x oluşumuna etkisi | 30 |
| Şekil 4.12 Nemlendirmenin egzoz sıcaklığına etkisi..... | 31 |
| Şekil 4.13 Nemlendirmenin hava fazlalık katsayısına etkisi..... | 31 |
| Şekil 4.14 Nemlendirmenin emme havasının sıcaklığına etkisi..... | 32 |
| Şekil 4.15 Nemlendirme için gerekli ısı ile egzozdan atılan ısının karşılaştırılması..... | 33 |

ÇİZELGE LİSTESİ

| | Sayfa |
|---|-------|
| Çizelge 2.1 Birincil ve İkincil kontrol stratejileri..... | 13 |
| Çizelge 2.2 Üçüncül kontrol stratejileri | 14 |
| Çizelge 4.1 Buhar üreticinin teknik özellikleri | 23 |
| Çizelge 4.2 Deney motorunun teknik özellikleri | 25 |
| Çizelge 4.3 Gaz analiz cihazının teknik özellikleri | 26 |
| Çizelge 4.4 Çalışma noktaları ve ölçüm sonuçları | 28 |

ÖNSÖZ

Diesel motorlarında emme havasının nemlendirilmesiyle NO_x emisyonunun azaltılması ve nemlendirme için tüketilen enerji ile egzoz enerjisinin karşılaştırılması konulu tez çalışmam esnasında benden bilgi ve yardımlarını esirgemeyen değerli tez danışmanım Otomotiv Anabilim dalı öğretim üyesi sayın Yrd. Doç. Dr. Muammer ÖZKAN' a ve katkılarından dolayı Termodinamik ve Isı Tekniği Anabilim dalı öğretim üyesi sayın Dr. Derya Burcu ÖZKAN, Otomotiv Anabilim dalı öğretim üyesi sayın Arş. Gör. Dr. Tarkan SANDALCI; ayrıca Otomotiv Anabilim dalı ve İmalat Anabilim dalı teknisyenlerine teşekkürlerimi bir borçbilirim.

ÖZET

Bu çalışmanın amacı günümüzde yaygın olarak kullanılmakta olan ve alternatif enerji kaynaklarına göre düşük güç/ağırlık oranı, kolay işletimi, basit bakım-onarımı, uzun ömrü ile önemli bir avantaja sahip olan küçük Diesel motorların egzoz emisyonlarının azaltılması için yeterince ucuz ancak etkili bir emisyon iyileştirme sisteminin geliştirilebilmesi için gerekli ön çalışmanın yapılmasıdır. Yüksek güçlü motorlarda başarıyla uygulanmakta olan EGR, katalitik konverter gibi gelişmiş emisyon iyileştirme sistemleri, yüksek maliyetleri ve karmaşık kontrol sistemi gerektirmeleri nedeniyle küçük Diesel motorlarında uygulanmamaktadır. Küçük Diesel motorlarda emisyonların azaltılması için genellikle püskürtme basıncının artırılması, püskürtme avansının azaltılması, sıkıştırma oranının yükseltilmesi gibi tasarıma dayalı konstrüktif çözümler ön plana çıkmaktadır. Bununla birlikte ticari rekabet nedeniyle küçük işletme ölçeğinde olan imalatçıların üretim maliyetlerinin mümkün olduğunca düşük tutulmaya çalışılması ayrı bir sınırlayıcı etkidir.

Çalışmada emme havası sınır şartlara kadar nemlendirilen bir Diesel motorun NO_x emisyonunun değişimi gözlenmiş ve emme havasında nemin artmasıyla NO_x emisyonunda %19-29 mertebelerinde bir azalma olduğu görülmüştür. Motor tarafından emilen havanın emme manifoldu şartlarında taşıyabileceği nemin temini için gerekli buharlaşma enerjisinin egzoz gazından alınabileceği, ölçüme ve teorik hesaba dayalı olarak verilmiştir.

Anahtar kelimeler: Diesel motorları, NO_x emisyonu, nemlendirme, buharlaşma enerjisi, ölçüm, teorik hesap

ABSTRACT

This research work is to make a required pre-study for developing efficient but cheaper emission improving system which will be used in small Diesel engines that are widely used and has advantages of having small power/mass ratio, easy operation, simple maintenance and long-life when compared to alternative energy sources. Systems like EGR that can successfully applied to high powered engines and advanced emission improvement systems like catalytic converter can not be applied to Diesel engines because of their complex control systems and high costs. For reducing the emissions in small diesel engines generally constructive solutions like increasing injection pressure, reducing fuel injection timing, increasing compression ratio comes to foreground. Nevertheless efforts of small enterprises keeping costs minimum because of trade rivalry is another limiting factor.

In this study emission changes in diesel engines that has humidified intake air till limit conditions has been observed and %19-29 decrease in NO_x emission with the raise of humidity in air has been seen. It has been given that in order to provide the amount of intake air can hold maximum humidity can be taken from evaporation energy of exhaust gas by measurement and theoretical calculation.

Keywords: Diesel engines, NO_x emission, humidity, evaporation energy, measurement, theoretical calculation

1. GİRİŞ

Yakıtların sadece karbon ve hidrojenden oluşması durumunda, tam yanmanın meydana gelmesi ile egzoz gazları içerisinde sadece karbondioksit ve su buharı oluşumu gerekir. Ancak hava yakıt karışımının homojen olmaması, yakıt moleküllerinin yeterli oksijen ile buluşmasını engeller. Bunun yanı sıra yanma işleminin kısa bir süre içerisinde tamamlanması, sıcaklıktaki hızlı değişim nedeniyle karışımın termik dengeye ulaşamaması yanmanın bozulmasına ve egzoz içerisinde yanmamış veya kısmen yanmış gazların bulunmasına neden olur.

Diesel motorlarında prensibi gereği, yakıt sıkıştırma prosesinin sonuna doğru, sıkıştırılmış hava ortamına sıvı fazda püskürtülür ve yanma odasında benzinli motorlara kıyasla daha kısa süre bulunur. Yakıtın silindir içerisinde heterojen dağılımı, sıcaklık ve yanmış gaz kompozisyonunun da heterojen olmasına neden olur. Bu sebeple HC, CO, CO₂, NO_x ve partiküller v.b. gibi insan hayatı ve çevre açısından büyük risk taşıyan emisyonlar meydana gelir. Dizel motorlarında, HC, CO, CO₂ emisyonları benzinli motorlara kıyasla daha az seviyelerdedir; ancak yanma esnasında is oluşumu ve çevreye tanecik şeklinde partikül emisyonları yaymaları açısından ve yanma prosesinde ilk yanan karışım miktarının ve yanma sonucu oluşan basıncın, yanmamış karışımı sıkıştırarak sıcaklıkları çok arttırması dolayısı ile NO oluşumuna etkisi açısından dezavantaja sahiptirler.

Diesel motor emisyonlarının sağlık açısından etkileri birçok sağlık örgütünün de dikkatini çekmiştir. Örneğin 1993 Kasım ayında The New England Journal of Medicine yayınladığı bir rapor ile dizel motor emisyonlarına maruz kalınmasının hayati açıdan risk teşkil ettiğini belirtmiştir. Daha yakın bir zamanda The American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine' da bu konuda bir çalışma gerçekleştirmiştir. 1988 yılında The National Institute for Occupational Health and Safety Diesel emisyonlarının kanserojen etki meydana getirebileceklerine dikkat çekmiştir. 1996'da The World Health Organization (WHO), 1995'te The Health Effects Institute (HEI) ve 1989'de The International Agency for Research on Cancer (IARC) Diesel emisyonlarının olası tehlikelerinden bahsetmişlerdir (ESI International, 1999).

NO_x reaksiyona girmeye eğilimli, NO, NO₂ ve N₂O bileşenlerinin genel adıdır. Yanma prosesi sonucu açığa çıkan emisyonlar NO₂ ve NO ağırlıklı olduğundan N₂O daha önemsizdir. NO_x oluşumunun yaklaşık %50'sini motorlu araçlardan, %20'si elektrik üretimi yapan santrallerden, %30'u endüstriyel kazanlar, yakma fırınları, gaz türbinleri, stasyonel Diesel motorlar, demir-çelik fabrikaları, çimento üreticileri, cam üreticileri, petrol rafinerileri

ve nitrik asit üreticilerinden kaynaklanır. NO_x ' in biyojenik veya doğal üretimi de yıldırımlar, orman yangınları, çimenlerin yakılması, ağaçlar, çalılar, çimenler ve mayadan gelir (EPA Technical Bulletin, 1999). NO_x amonyak ve benzeri komponentler ile kolayca reaksiyona girerek nitrik asit ve benzeri zararlı maddelerin oluşumuna sebebiyet verir. Oluşan bu maddeler akciğer dokularına zarar verirler. Bu maddelerden küçük olanları da akciğere yerleşerek emphysema ve bronşit gibi ölümcül olabilecek enfeksiyonlara sebep olabilirler. Bunun yanında NO_x ve VOC ısı ve güneş ışığı ile reaksiyona girmesi ile astım hastaları, çocuklar v.b. kişilerin akciğer fonksiyonlarında azalma ve akciğer doku zedelenmelerine neden olabilir. Diğer bir önemli konuda NO_x ve SO_2 'nin havadaki diğer maddeler ile oluşturdukları dünya yüzeyine yağmur, kar, sis ve katı parçacıklar olarak inen asit yağmurlarıdır. Asit yağmurları da tarihi eserlere, binalara, araçlara ve hatta göl ve nehirlerdeki canlı yaşamına bile etki edebilmektedir (Facts on NO_x Reduction).

NO_x atmosferik nitrojen ve oksijen yardımı ile 1600°C ve üzerindeki sıcaklıklarda oluşan zincirleme reaksiyonlardan meydana gelir. NO_x oluşumunda diğer bir etken de yakıt nitrojenidir; ancak günümüzde yakıt içerisindeki nitrojen miktarı oldukça düşük seviyelerde tutulduğundan bu mekanizma önemsenmemektedir. NO_x direkt yanmanın esas ürünü olarak ortaya çıkamaz, istenmeyen ikincil reaksiyonların bir ürünüdür. Yanmış gazlar, genişleme stroğunda hava veya yanmış soğuk gazlarla karışarak NO bozunma reaksiyonlarının durmasına (donmasına) ve bu sayede silindir içindeki NO_x konsantrasyonunun yüksek miktarlarda kalmasına neden olurlar. Diesel motorlarındaki bu donma mekanizmasının benzinli motorlara kıyasla daha fazla tekrarlanması nedeniyle NO_2/NO oranı benzinli motorlara oranla daha yüksektir (P. Eastwood, 2001).

Nitrojen oksitler en zor kontrol edilen gaz kirleticilerdir. Diesel motor emisyon içeriğinin oksijen bakımından zengin olması, oksijenin NO_x 'ten katalitik bir reaksiyon yardımı ile indirgenme işlemini güçleştirir. Bunun yanında katalitik reaksiyonun oluşumunda katalist görevi gören HC, CO veya H_2 'nin yeterli miktarda bulunmaması, NO_x 'in nitrojene indirgenmesini engelleyen diğer bir nedendir (MECA, 2000).

2. DIESEL MOTORLARINDA NO_x KONTROL STRATEJİLERİ

Diesel motorlarında NO_x emisyonlarının azaltılması için temelde birincil, ikincil ve üçüncül stratejiler olarak gruplandırabileceğimiz üç yol izlenmiştir. Birincil kontrol stratejilerinde emisyon kontrolü yanma öncesinde; ikincil kontrolde yanma esnasında termodinamiksel olayların kontrolü ile; üçüncül kontrolde ise nitrojen oksitlerin egzoz sürecinde atmosfere atıldığı dönemde yapılan kontrollerdir.

2.1 Birincil Kontrol Stratejileri

Birincil kontrol stratejileri, silindir içersine sokulan taze dolgu ve yakıtın homojen karışımı ile uygun bir yanma meydana gelmesi, NO_x oluşmasında etkili olan pik sıcaklıkların düşürülmesi, emme havasının seyreltilmesi gibi önlemlerle, yanma olayının gerçekleşmesinden önce NO_x formunun oluşmasını en aza indirmeyi hedefleyen motor modifikasyonları ve yakıt kompozisyon değişimlerini kapsar (Union of Concerned Scientists, 1999).

2.1.1 Yakıt Enjeksiyon Parametreleri

2.1.1.1 Enjeksiyon Zamanı ve Miktar Ayarı

Diesel motorlarında püskürtme zamanının geciktirilmesi, yanmanın genişleme stroğuna kayması ve bu sayede maksimum silindir içi sıcaklıkların düşürülmesi esasına dayandığı için; NO_x azaltılmasında tercih edilen klasik bir yöntemdir. Bunun yanında çok delikli enjeksiyon, EKÜ yardımı ile kademeli yakıt püskürtme yapılması (yakıt enjeksiyonunun geniş bir zamana yayılması) ve enjeksiyon oranları ile oynanması gibi günümüzde kullanılan yöntemler sayesinde Diesel motorlarında NO_x emisyonları daha aşağılara çekilmiştir.

Nehmer ve Reirz (1994), yaptıkları deneyde bölünmüş enjeksiyonun (ilk enjeksiyon üst ölü noktadan önce; diğeri üst ölü nokta sonra yapılmak şartı ile), NO_x ve partikül dengesini etkilediğini görmüşlerdir. Yakıtın %25'inin üst ölü noktadan önce, %75'inin üst ölü noktadan sonra enjektresinin ve 50-50 oran ayarlı püskürtmenin NO_x oluşumunu azalttığını ve tekli enjeksiyonun aksine is miktarında bir artışa neden olmadığını savunmuşlardır. Tekli enjeksiyonda da püskürtme zamanının geciktirilmesinin NO_x emisyonlarının oluşumunu azalttığı da verilerden açıkça görülmektedir.

2.1.1.2 Enjeksiyon Basıncı

Enjeksiyon basıncının düşürülmesi türbülansı düşürmesi nedeni ile hava yakıt karışımını etkiler ve daha düşük NO_x emisyonu (oluşmasına neden olur) sonuçları ortaya çıkar. Düşük basınç nedeni ile daha büyük sıvı fazında kalan yakıt partikülleri ortamdan ısı çekerek buharlaştığı için sıcaklık düşer ve NO_x miktarı azalır. Ancak düşük basınç duman ve partikül emisyonlarında büyük artışa neden olur (ESI International, 1999).

Diğer taraftan yüksek püskürtme basınçları ile yakıt buharında daha küçük yakıt zerrecikleri oluşturulması ve daha hızlı homojen karışım sağlanması; aynı zamanda tutuşma gecikmesi kısaltılarak silindir içi pik basınçlar azaltılması yoluyla da NO_x oluşumu azaltılabilmektedir (Nehmer ve Reirz, 1994).

2.1.2 Yakıt Kompozisyonu

Diesel yakıtı üzerinde yapılan çalışmalar setan sayısının etkisi üzerinde durmaktadır. Daha yüksek setan sayısı daha az tutuşma gecikmesi anlamına gelir. Bu sürenin kısalması, silindirde NO_x artımına neden olan yüksek silindir içi sıcaklıkların düşmesine neden olur. Yüksek setan sayısına sahip DME, Fischer-Tropsch* Diesel gibi alternatif yakıtların kullanımı ile NO_x emisyonları daha aza indirilebilmektedir

Yüksek Karbon/Hidrojen oranına sahip yakıtlar, artan alev sıcaklıkları nedeni ile daha yüksek NO_x konsantrasyonu oluştururlar. Diğer taraftan yakıtın özellikleri dışında yakıtın kullanıldığı motorun yapısı, yanma odası dizaynı, püskürtme basıncı gibi konstrüktif ve işletme parametreleri de önem taşır.

Uygun hava + yakıt karışımı için en önemli parametreler püskürtme basıncı, oranı ve yanma odası dizaynı olmasına rağmen yakıt yoğunluğu da homojen hava + yakıt karışımı açısından önem taşır. Eski tip motorlarda yakıt yoğunluğunun azaltılması ile partikül ve NO_x emisyonları düşürülmesi yoluna gidilmesine rağmen; günümüzün modern motorlarında bu yöntem elektronik kontrollü püskürtme sistemleri sebebiyle önemini kaybetmiştir (Union of Concerned Scientists, 1999).

Silindir içersinde yüksek sıcaklıklarda yanan aromatik hidrokarbonların yakıt içersindeki miktarlarının azaltılması ile NO_x emisyonlarını azaltıcı yönde ilerleme kaydedilebilmektedir; ancak bu uygulama partikül emisyonlarında az da olsa bir artış meydana getirmektedir (Union of Concerned Scientists, 1999).

* Fischer-Tropsch, hidrojen ve CO_2 'den oluşan sentez gazının, sıvı sentetik ham petrole dönüşüm prosesidir.

2.1.2.1 Ultra Düşük Azotlu Yakıtların Kullanımı

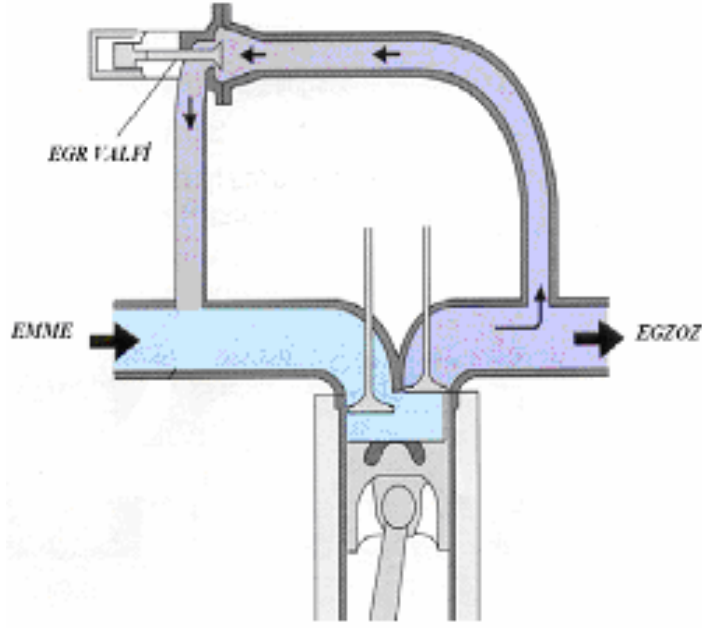
Bu yöntemde normal Diesel No:2 yakıtının içerdiği azot miktarından 15-20 kat daha az azot içeren yakıt kullanılmakta ve NO_x emisyonlarında %70'e varan azalma elde edilebilmektedir. Hava kirliliğinin önemli boyutlarda olduğu Güney California'da ultra düşük azotlu Diesel yakıt kullanılmaktadır (EPA Technical Bulletin, 1999).

2.1.3 Emme Oksidant Modifikasyonu

Silindir içi sıcaklıktaki düşüş NO_x oluşumunu azaltmaktadır. Turboşarj kullanılan motorlarda, emme manifoldunda havanın sıcaklığı, gerek turboşarjın egzoz sisteminin yakınında olmasından, gerekse basıncı arttırılan gazların ısınmasından dolayı artar. Isınarak yoğunluğu azalan ve volümetrik verimin düşmesine neden olan bu sıcak havayı soğutarak silindir içersine göndermek amacıyla ara soğutucu kullanılmaktadır. Gaffarpour ve Baranescu (1996), yaptıkları çalışmada Diesel motorlarında ara soğutucu kullanımının NO_x miktarında %15 civarında azalma sağladığını tespit etmişlerdir. Yine NO_x konsantrasyonunun azaltılması açısından ara soğutucunun yüksek hız ve ortalama yükte, enjektör oran ayarından daha etkili olduğu gözlemlenmiştir.

2.1.3.1 EGR Kullanımı

EGR, egzoz gazlarının ısı kapasitesini kullanarak, yanma odasında oluşan yüksek sıcaklıkları düşürmek ve bu sayede NO_x emisyonlarını azaltmak amacıyla, egzoz gazlarının bir kısmının tekrar yanma odasına yollanması esasına dayanır (Şekil 2.1). Yapılan çalışmalarda emme havasının egzoz gazları ile seyreltilmesi, NO_x emisyonlarında büyük düşüşler oluşturduğu görülmüştür. Silindire geri döndürülen egzoz gazları silindir içersindeki oksijenin etkinliğini azaltırken, emilen dolgunun ısı kapasitesini arttırır, silindir içi pik sıcaklıkları düşürerek NO_x oluşumunu yavaşlatır.



Şekil 2.1 EGR sistemi (UTI web site)

Literatürde, Diesel motorlarında EGR uygulaması konusunda birçok araştırma yapılmıştır. Yu ve Shaded bir Diesel motorunda NO_x emisyonlarını EGR ve ateşleme zamanının geciktirilmesi ile azaltmış ve her iki metodun eşit şekilde etkili olduğunu iddia etmişlerdir. French vd. turboşarjlı bir Diesel motorunda yaptıkları çalışmada EGR kullanımı ile partikül emisyonlarında önemli oranda artış olmadan NO_x emisyonlarında %50'ye varan azalma olabileceğini göstermişlerdir (Levendis vd., 1994). EGR kullanımı diğer yöntemlere kıyasla daha ucuz ve basit olması nedeni ile tercih edilmektedir. Ancak egzoz gazlarının motor yüküne ve hızına göre kontrolü büyük önem taşır.

2.2 İkincil Kontrol Stratejileri

İkincil kontrol stratejileri, yanmanın meydana geldiği silindir içersinde yapılabilecek olan modifiyeler, emme havasının kontrolü ve yanmanın termodinamiksel yapısının değiştirilmesi ile NO_x formunun oluşumunu en aza indirmeyi hedefler.

2.2.1 Yanma Odası Tasarımı

İçten yanmalı Diesel motorlarda yanma odası, yapısına göre iki grupta sınıflandırılabilir. Yakıtın direkt yanma odasına püskürtüldüğü direkt püskürtmeli (DI) ve yakıtın ilk olarak bir ön yanma odasına püskürtüldüğü bölünmüş yanma odalı motorlar (IDI) .Yapılan deneysel çalışmalarda bölünmüş yanma odalı motorların egzoz emisyonlarında, direkt enjeksiyonlu motorlara oranla daha az NO_x konsantrasyonu bulunduğu görülmüştür. Bunun sebebi yanmanın ilk kademesinde zengin karışım şartları ile karşılaşılması nedeniyle oksijen etkinliğinin azalması ve buna ilaveten çevreye hızlı bir ısı geçişi söz konusu olması nedeniyle yanma odası sıcaklığının düşmesidir. Ancak yanmanın ikinci fazında, yanma odasına geçen karışım, soğuk havayla bulunduğu için NO ' in bozunması durur ve silindiri terk ederken, oksijen ile reaksiyona girerek ön yanma odasına kıyasla daha fazla NO_x meydana getirir (Bu oran yine de DI' lu motorların 1/4 oranındadır) (Murakami, 1997).

2.2.2 Emme Manifoldu ve Emme Kanalı Tasarımı

Emilen havaya dönme hareketi verilmesi yakıt ile havanın yanma odasında daha hızlı karışmasına neden olur. Dönme hızının azaltılması hava ile yakıtın karışım hızını düşürür, bu durumda yanma hızının düşmesine neden olurken, yanmanın kademeli olması ve sonuç olarak NO_x emisyonlarının azalmasına neden olur. Bunun yanında dönme hızının azaltılması, yakıt ve havanın silindir içersinde homojen karışım oluşturmasını engeller ve belli bölgelerde yakıtça zengin yanmamış hava yakıt karışımlarının oluşmasına neden olur. Bu durum hem iyi bir yanma prosesini engel olur hem de HC ve PM emisyonlarında artış meydana getirir (ESI International, 1999).

2.2.3 Silindir İçersine Su İlavesi

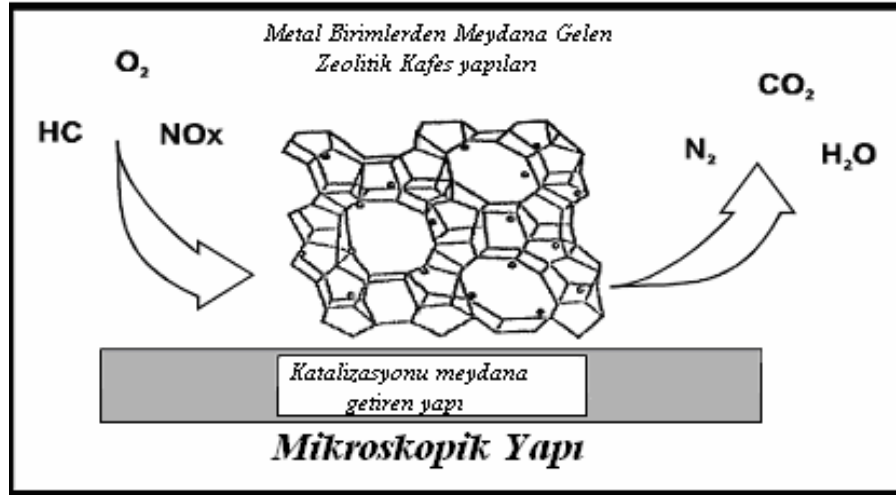
Silindir içersine su ilavesi, silindire sokulan suyun buharlaşma enerjisini yakıtın yanması sonucu açığa çıkan enerjiden alması nedeniyle alev sıcaklığını düşürülerek NO_x formasyonu azaltmaktadır. Suyun ilavesi iki ayrı teknik ile yapılmaktadır. Bunlardan ilki yanma odasına direkt su enjeksiyonu (yakıt enjektörü vasıtasıyla yada su enjeksiyonu için ayrı bir enjektör ile); ikincisi ise emülsiyon tekniği ile suyun yanma odasına yakıt ile karışım oluşturularak enjeksiyonudur. Yapılan çalışmalarda NO_x emisyonlarında, direkt su enjeksiyonu ile ~%50 ve üzerinde Ohashi vd., (1995), emülsiyon tekniği ile de ~%85'e varan azalmalar kaydedilmiştir (Bedford vd., 2000).

2.2.4 HCCI

Bu yöntem yakıtın silindir içersine girmeden hemen önce püskürtülerek emilen havayla temas etmesi (port fuel injection); ve bu sayede silindir içersinde homojen yakıt + hava karışımı alanları oluşması esasına dayanmaktadır. Ateşleme sıkıştırma periyodunda çok noktadan enjeksiyonla sağlanmakta ve alev sıcaklıkları düşürülerek NO_x oluşumu en aza indirilmektedir. Buna karşın Dickey vd., göre HCCI yönteminin motorun her bir yük ve hız pozisyonlarına uygulanabilirliği konusunda zorluklarla karşılaşmıştır (Union of Concerned Scientists, 1999).

2.3.2 Lean-NO_x Katalistleri

Bu sistemde zeolit kafes adı verilen zeolittik hücresel yapının egzoz gazı ile uygun sıcaklıkta teması sağlanarak NO_x, HC ve CO' in; N₂, O₂ ve H₂O'ya ayrışması sağlanır. NO_x miktarındaki azalma %15-20 civarlarındadır. Diesel yakıtın bir kısmının Lean-NO_x katalistinin girişine püskürtülmesini sağlayan bir sistem kullanılarak NO_x miktarında ~%35-45'e varan ek azalmalar sağlanabilir (püskürtülen yakıt miktarının yakıt ekonomisine etkisi önemsenecek derecede azdır) (ESI International ,1999). Günümüzde stasyonel Diesel motorlarda da kullanılabilen Lean-NO_x teknolojisi ile NO_x emisyonlarında %80'e varan azalmalar sağlanabilmektedir(MECA Status Report, 1997). Bu sistemle ilgili yapılan deneylerde kurulum maliyetinin çok yüksek olmadığı, yakıt ekonomisine etkisine etkisinin fazla olmadığı tespit edilmiştir (Hoard vd., 2000).



Şekil 2.3 Zeolit yapıdaki lean-NO_x katalisti (ESI International, 1999).

2.3.3 Elektro Katalistler

Washman vd., (1998) yaklaşımı ile 1V'luk bir gerilim yardımıyla bir zirkonya tip elektro kimyasal hücrenin katodu ile NO_x oranını düşürme yoluna gidilmiş ve N₂ ve O²⁻ iyonlarının ortaya çıkması sağlanmıştır (P.Eastwood, 2001). Elektro kimyasal hücrenin katodunda meydana gelen reaksiyon:



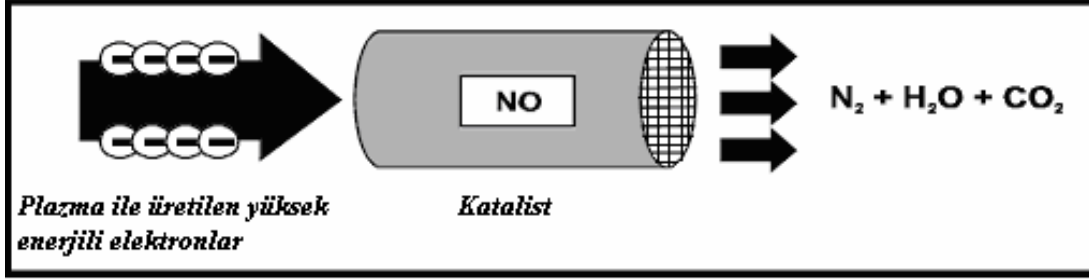
Oksijen iyonları elektrolitten geçmek suretiyle anotda gaz halinde açığa çıkarlar.





Bu sistemdeki en büyük problem güç ihtiyacıdır. Elektro katalistler üzerindeki çalışmalar devam etmektedir.

2.3.4 Plazma Destekli Katalitik Redüksiyon

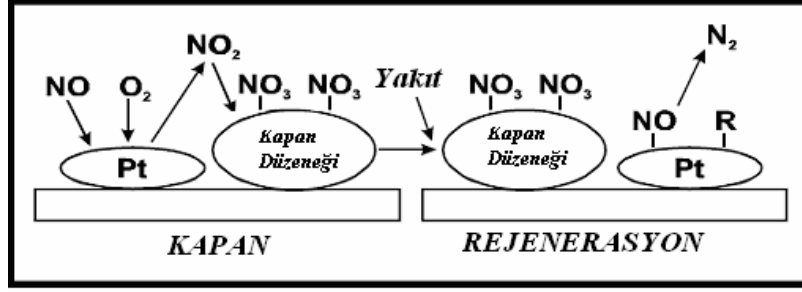


Şekil 2.4 Plazma destekli katalitik redüksiyon teknolojisi (ESI International, 1999).

Bu çalışmada katalist içersine yüksek enerjili elektronlar üreten plazma yapı yerleştirilmek suretiyle, katalistin egzoz gazları ile reaksiyona girmesi sağlanır. Ve ürün olarak CO_2 , N_2 ve H_2O meydana gelir. Yakıt tüketiminin arttığı zamanlarda daha etkili NO_x redüksiyonu sağladığı (%60'ın üzerinde) yapılan çalışmalarda tespit edilmiştir (Hoard vd., 2000).

2.3.5 Lean- NO_x Kapanları

Lean- NO_x kapanları son zamanlarda araştırmacıların üzerinde yoğunlaştığı bir diğer tasarımdır. Bu sistemde egzoz gazlarından elde edilen NO_x ' in hapsedilerek daha sonraki aşamada indirgeme amaçlı kullanılması amacına dayanır.



Şekil 2.5 Lean-NO_x kapan teknolojisi (ESI International, 1999).

Şekil 2.5'te görüldüğü üzere ilk adım kapan kısmıdır. Bu bölümde NO, platinyum malzeme içersinden geçirilerek O₂ yardımıyla NO₂' ye dönüştürülür. Ardından Açığa çıkan NO₂, tipik bir alkali metal kapan ve oksijen ile reaksiyona girer (Metal nitrat oluşur). Daha sonraki aşama rejenerasyondur. Bu aşamada bir miktar yakıt püskürtülerek metal nitrat ile hapis olan NO_x' in reaksiyona girmesi ve nitrojen açığa çıkması sağlanır. Bu teknoloji ile NO_x emisyonlarında ~%60-70'e varan azalma sağlanabilir (ESI International, 1999).

Motorlu araçların insanlara sağladığı ulaşım rahatlığı vazgeçilemeyecek bir husustur. Ancak egzoz emisyonlarının neden olduğu kirlilik her geçen gün daha da büyük boyutlara ulaşmaktadır. Bu durum araştırmacıları öncelikle emisyonları önleme yöntemleri üzerinde çalışmaya itmektedir. Buradan hareketle yukarıda bahsi geçen ve üzerlerinde birçok araştırmalar yapılan NO_x kontrol stratejilerinden biri olan yanma odasına su veya buhar gönderilmesinin, egzoz emisyonlarına ve motor performansına olan etkisinin deneysel olarak incelenmesi konusunda da birçok çalışma yapılmıştır.

2.4 NO_x Kontrol Stratejilerinin Avantaj ve Dezavantajları

Çizelge 2.1 Birincil ve ikincil kontrol stratejileri (Union of Concerned Scientists, 1999).

| Teknoloji | NO _x miktarında azalma | Sonuç |
|-----------------------------|---|--|
| Yanma odası tasarımı | %10 | |
| EGR | %5-15 | Stabil olmayan yanma, motorda aşınma, yakıt ekonomisi getirir |
| Yakıt enjeksiyon sistemi | %42 | Kompleks ve maliyeti yüksek |
| Emme Oksidant modifikasyonu | %0-15 | Maliyeti yüksek |
| HCCI | %65-70 | Motorun her yük ve hız pozisyonunda kontrolü zor |
| Yakıt Kompozisyonu | | |
| Yüksek Setan sayısı | %0-5 | Petrol rafinerilerinde değişim ve yeni yatırım maliyetleri getirir |
| Düşük yakıt yoğunluğu | %0,1 | |
| Düşük Aromatik HC | %0-5 | |
| DME | %50-75 | Yeni ürünle ilgili çalışma gerektirir, Yakıt dağıtım sistemine değişiklikler ve ilaveler getirir |
| Fischer-Tropsch Diesel | %10-30 | Yeni ürünle ilgili çalışma gerektirir |
| Silindire su ilavesi | ~%50 (direkt enjeksiyon) ~%85 (emülsiyon) | Yakıt dağıtım sistemine değişiklikler ve ilaveler getirir |

Çizelge 2.2 Üçüncül kontrol stratejileri (Union of Concerned Scientists, 1999).

| Teknoloji | NO_x miktarında azalma | Kullanım | Sonuç |
|--------------------------------------|---|--|--|
| SCR | %40-45 %70-90 | Yakın zamanda Deneme aşamasında | Ürenin depolama problemi ile karşılaşılmakta |
| Lean-NOx Katalistleri | %10-35 %20-50 | Yakın zamanda Deneme aşamasında | Daha etkili olabilmesi için egzoz gazına püskürtülen yakıt içerisindeki HC miktarının artırılması gerekmekte |
| Elektro katalistler | | Deneme aşamasında | |
| Plazma-Destekli Katalitik Redüksiyon | %35-70 | Deneme aşamasında | Araştırma ve geliştirme aşamasında |
| Lean-NOx Kapanları | %50-95 %52 | Deneme aşamasında Deneme aşamasında | Dayanıklılık problemi, egzoz gazına püskürtülen HC miktarının artırılması gerekmekte |

3. DİESEL MOTORLARINDA EGZOZ EMİSYONLARININ AZALTILMASI AMACIYLA YANMA ODASINA SU İLAVESİ KONUSUNDAKİ ÇALIŞMALAR

1930'larda benzinli motorlarda ve II.Dünya Savaşı sırasında uçak motorlarında vurunutuyu önlemek amacıyla silindir içerisine su katılması üzerine bazı çalışmalar yapılmıştır. Ancak gerekli suyu püskürtecek sistemi sağlayacak su tankı ve enjeksiyon sisteminin getirdiği maliyet ek uygulamanın yaygınlaşması açısından ek sorunları beraberinde getirmiştir. Ayrıca direkt su enjeksiyonu motorda korozyon problemine neden olmuştur. Bu sebeple araştırmalar daha çok su ve yakıtın karıştırılacağı alternatifler üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu teknikle hem pik sıcaklıklar düşürülmüş hem de suyun motorla direkt teması önlenmiştir. Ancak emülsiyon tekniğinin en önemli problemleri hala tam olarak önu kesilemeyen motorda korozyona sebebiyet vermesi, pik sıcaklıklardaki azalmalardan ötürü oluşan güç kayıpları ve motor işletim şartına göre ayarlanamayan yakıtı karıştırılan su miktarıdır (EPA Draft Technical Report, 2002).

Yapılan literatür taraması sonucunda Diesel motorlarında yanma odasına su gönderme işleminin dört farklı yöntemle gerçekleştirildiği görülmektedir:

3.1 Enjeksiyon Yöntemi ile Yanma Odasına Su Gönderilmesi

Bu yöntemde su, su enjeksiyon nozüllerinden silindir içersine yada IDI motorunda türbülans odasına enjekte edilir.

Ohashi vd., (1995) yaptıkları çalışmada bir türbülans odalı Diesel motorunda yanma odasına direkt su enjektesinin NO_x ' in azaltılması üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Suyun uygun zamanda enjektesi için yakıt enjektesinden bağımsız bir su püskürtme sistemi, hem ana hem de türbülans yanma odasına yerleştirilmiştir.Türbülans odasındaki ısı dağılımı yüksek hız fotoğrafçılığı ve 2 renk metoduyla sayısal olarak analiz edilmiştir.

Türbülans odasına yakıt püskürtmeden önce direkt su enjektesi geniş bir aralıkta özgül yakıt tüketimini etkilemeden NO_x emisyonlarını büyük oranda düşürmüştür. Diğer emülsiyonlarda su enjektesi ile büyük oranda değişmemiş veya çok az oranda düşmüştür.

Deneyin sonuçlarına göre türbülans odasına su enjektesi, ana yanma odasına enjektenden daha etkilidir ve türbülans odasına yakıt enjektesinden önce 6-10° KMA zamanında su enjektesi NO_x ' i %50'den daha fazla düşürmüştür.

Yine Nakagawa vd., (1996) , tek bir nozülde hem su hem yakıt enjektörünü araştırmışlardır. Çıkan sonuçlara göre su enjeksiyonu NO_x ve dumanı çarpıcı biçimde azaltmıştır. Bunun yanında yanmanın kendisi iyileşse de eğer yakıt enjeksiyon zamanlaması değiştirilmezse suyun gizli ısı ve sabit hacimde yanma derecesinin düşmesi sebebiyle yakıt tüketimi artar. Bu deneydeki test döngüsüne göre NO_x , PM ve yakıt tüketiminin azaltılması konusunda su enjeksiyonun, geciktirilmiş yakıt enjeksiyon sistemlerinden daha etkili olduğu görülmüştür.

3.2 Yakıt + Su Emülsiyon Tekniği ile Yanma Odasına Su Gönderilmesi

Bu yöntemde su yakıtla karıştırılarak yanma odasına gönderilmektedir.

Bedford vd., (2000) Diesel motorlarında yanma odasına yakıt-su enjeksiyonunun etkisini CFD programı olan Kiva 3V ile incelemişlerdir. Bu deneyde su-yakıt karışımı enjeksiyon sırasında sağlanmakta ve enjekte sprey şeklinde yapılmaktadır. Deney verilerine göre motorun düşük yüklerinde partikül ve NO_x emisyonlarında enjeksiyon zamanlamasının da değiştirilmesi ile önemli azalmalar kaydedilmiştir (düşük yükte su/yakıt oranı artırılması ile NO_x 'de %50'lik azalmanın yanında, yakıt sarfiyatında, en büyük artış %1,9 olmuştur). Motor fazla yüklendiğinde enjeksiyon süresinin uzaması ile daha fazla püskürtülen su sebebiyle NO_x 'teki azalmaya rağmen is oluşumunda ve yakıt sarfiyatında artma görülmüştür (fazla yükte oluşan NO_x miktarında %85'lik azalmaya kadar çıkmış, su/yakıt oranının artırılması %15'lik yakıt sarfiyat artışına neden olmuştur).

Bedford vd., (2000) kullandıkları tekniğin sıvı fazdaki suyun emme manifolduna gönderilmesi, su + yakıt emülsiyonu gibi tekniklere göre bazı avantajlar taşıdığını savunmuşlardır. Sıvı fazda emme manifolduna gönderilen suyun, emisyonların azaltılmasında etkisiz kalacağı bölgelere doğru hareket etmekte olduğunu, NO_x 'de istenen miktarda azalmanın sağlanması için, motor çıkışında ikinci bir enjeksiyona ihtiyaç duyulduğuna değinmişlerdir.

Su + yakıt emülsiyon tekniğinin de NO_x ve partikül emisyonlarının azaltılması açısından yine önemli bir teknik olduğunu; ancak yanma odasında yanmanın erken devrelerinde düşük sıcaklıklar yaratarak, tutuşma gecikmesini arttırdığını ve motorda gürültü meydana getirdiğini savunmuşlardır. Yine su + yakıt emülsiyon tekniğinde Diesellerin soğukta çalışma koşullarında yapılan aynı miktarda su enjeksiyonu sebebiyle bazı problemler oluştuğuna dikkat çekmişlerdir.

Su + yakıt sprey tekniğinin yukarıda bahsedilen tekniklere göre avantajlarına rağmen artan yüklerde püskürtülen su miktarının artırılması ile is oluşumuna sebebiyet vermesi ve pahalı olması dezavantaj oluşturmaktadır.

3.3 Emme Havası + Su Kombine Tekniği

Su, yanma odasına emme havası ile sıvı fazda kombine gönderilmekte ve yakıtla karışmaktadır.

Odaka vd., (2002) yaptıkları çalışmada hem yanma odası hem de yakıt püskürtme sisteminde modifikasyona ihtiyaç duyulan yüksek basınçlı su püskürtme metodu yerine; daha düşük basınçlarda su püskürtülmesine olanak sağlayan emme manifolduna su püskürtülmesi metodunu Diesel motorunda uygulamışlardır. Motor gücünde önemli bir kayıp olmadan ve is emisyonlarında kayda değer bir artış saptanmadan NO_x emisyonlarında ~%40'lık bir azalma elde etmişlerdir. Buna karşın CO ve HC emisyonlarında hafif yüklerde artışlar kaydedilmiştir.(Bu artış yükün artırılması ile istenilen limitlere inmiştir.)

Yine aynı çalışmada EGR ve manifolduna su enjeksiyon tekniğinin kombine kullanımı ile emisyonlar makul değerlerde tutularak NO_x emisyonlarında ~%50'lik bir azalma kaydedilmiştir.

Kegl ve Pehan, (2001) 4 silindri bir kamyonun motorunda, emme manifolduna çok noktadan su enjeksiyonu, turboşarjdan önce tek noktadan su enjeksiyonu, turboşarjdan sonra tek noktadan su enjeksiyonu ve su+yakıt emülsiyonunun silindir içine enjeksiyonunun karşılaştırmışlardır.

Emme manifolduna çok noktadan enjeksiyonda, 4 farklı enjektörle EKÜ yardımıyla emme kanallarına uygun zamanlarda su püskürtülmesi yoluna gidilmiştir. Turboşarjdan önce tek noktadan su enjeksiyonunda, turboşarjın hemen öncesinde yerleştirilen enjektör ile su damlacıklarının silindirlere homojen dağılımı sağlanmaya çalışılmıştır. Turboşarjdan sonra tek noktadan su enjeksiyonunda, emme manifolduna tek bir enjektör ile su püskürtülerek silindirlere dağıtılmıştır. Su + yakıt emülsiyonunun silindir içersine enjeksiyonunda ise emme ve egzoz valfleri arasına yerleştirilen enjektör yardımı ile silindir içersine su + yakıt enjektisi sağlanmıştır.

Kegl ve Pehan, (2001) çalışmaları sonucunda 4 farklı yöntemin mukayesesi yapılmış ve Yakıt tüketimini kötüleştirmeden, PM ve NO_x emisyonlarında en önemli düşüşü su + yakıt

emülsiyon tekniğinin gerçekleştirdiğini tespit etmişlerdir.

3.4 Emme Havaının Nemlendirilmesi Yöntemi

Su, yanma odasına emme havası ile birlikte gaz fazında gönderilmekte ve silindir içerisinde püskürtülen yakıtla karışmaktadır.

4. KULLANILAN YÖNTEM VE MATERYALLER

4.1 Yöntem

4.1.1 Silindir İçersine Buhar Fazında Su Gönderilmesinin Etkisinin Araştırılması

Silindir içersine buhar fazında su göndermenin yanma sonu sıcaklığı dolayısıyla NO_x emisyonu üzerine önemli bir etkisi olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada silindir içersine buhar fazında su sokulmasının silindir içi sıcaklığına etkisinin belirlenmesi amacıyla emme havası ile silindir içersine gönderilen buharın yanma sonu sıcaklığına etkisi Diesel motorunun ısı analizi yapılarak analitik olarak hesaplanmıştır. Silindir içersine buhar fazında su sokulmasının silindir içi sıcaklığında meydana getirdiği azalmanın, NO_x oluşumu üzerine etkisi deneysel olarak tespit edilmiştir.

4.1.1.1 Isı Analizi

$$\xi_z H_{w,m} + (mc'_{v})_{t_0}^m t_m = \mu (mc''_{v})_{t_0}^z t_z \quad (4.1)$$

(4.1) Korelasyonuna göre yakıt + hava karışımının yanma ısı ve yakıt + hava karışımının sıkıştırma prosesinin sonundaki ortalama molar spesifik ısısının toplamı; yanma sonu ürünlerinin ortalama molar spesifik ısısına eşitlenmektedir.

Motor çalışma şartlarında sabit basınç ve hacimde ısı sokumu ile bu korelasyon :

$$\xi_z H_{w,m} + [(mc'_{v})_{t_0}^m t_m + 8.315\lambda_1] t_m + 2270(\lambda_1 - \mu) = \mu (mc''_{v})_{t_0}^z t_z \quad (4.2)$$

halini almaktadır.

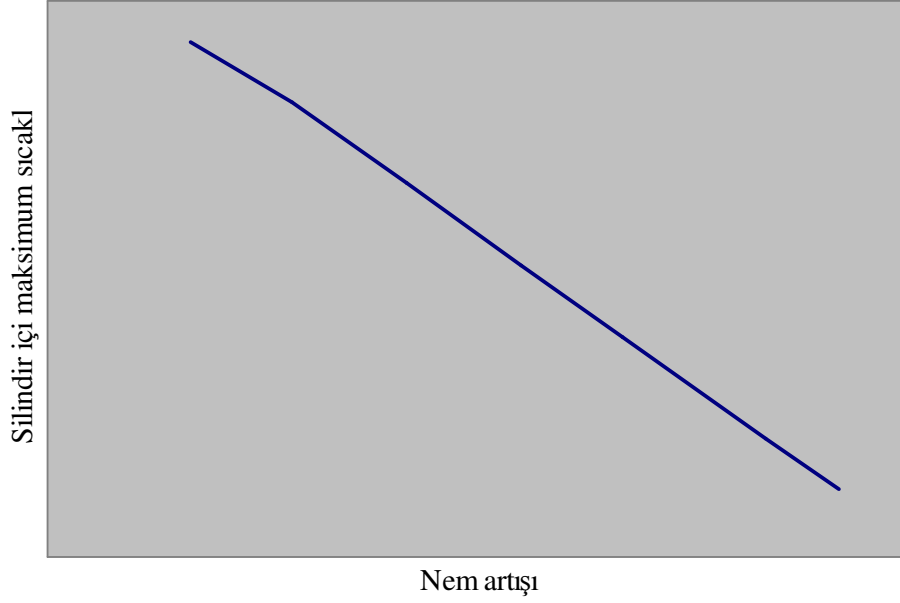
Diesel motorunda yanma sonu ürünlerinin ortalama molar spesifik ısısı ise:

$$(mc''_{v})_{t_0}^z = (1/M_2)[M_{CO_2} (mc''_{vCO_2})_{t_0}^z + M_{H_2O} (mc''_{vH_2O})_{t_0}^z + M_{O_2} (mc''_{vO_2})_{t_0}^z + M_{N_2} (mc''_{vN_2})_{t_0}^z] \quad (4.3)$$

olarak bulunur.(4.3) No 'lu korelasyonda emme havasına gaz halinde gönderilen su miktarı yanma ürünü olarak ortaya çıkan suya bir "k" katsayısı olarak ilave edilirse:

$$(mc''_v)_{t_0}^{t_z} = (1/k.M_2)[M_{CO_2}(mc''_{vCO_2})_{t_0}^{t_z} + (k.M_{H_2O})(mc''_{vH_2O})_{t_0}^{t_z} + M_{O_2}(mc''_{vO_2})_{t_0}^{t_z} + M_{N_2}(mc''_{vN_2})_{t_0}^{t_z}] \quad (4.4)$$

karşımıza çıkar.Gereken sabitler ve katsayıların yerleştirilmesinden sonra (4.4) korelasyonu ile gaz fazında silindire su ilavesinin silindir içi maksimum sıcaklıklara etkisi tespit edilebilir. Normal yanma sonu sıcaklıklar ile de karşılaştırılabilir.(Şekil 4.1)



Şekil 4.1 Nemlendirme etkisi ile silindir içi maksimum sıcaklıkların değişimi

Gaz fazında silindir içersine su ilavesi ile yanma sonu sıcaklıkları, Şekil 4.1'de görüldüğü üzere lineer bir düşüş göstermiştir.

Emme havasının buhar kullanılarak nemlendirilmesi, buharın ısı kapasitesi nedeniyle emme havası sıcaklığının artmasına neden olur. Dolgu sıcaklığındaki bu artış, sıkıştırma sonu, yanma sonu sıcaklıklarını ve NO_x emisyonlarının artmasına neden olur. Söz konusu bu artış nemlendirmenin NO_x emisyonu üzerindeki olumlu etkisi tarafından giderilmektedir. Karşılaşılan bu durum, emme havasının buhar ile nemlendirilmesi sonucu emme havası sıcaklığındaki artışın NO_x emisyonuna etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Isıtıcı kullanılarak arttırılan emme havası sıcaklığına bağlı NO_x değişimi belirlenmiştir ve çalışma noktaları ve ölçüm sonuçları bölümünde bir grafikte bu konuya yer verilmiştir (Şekil 4.14).

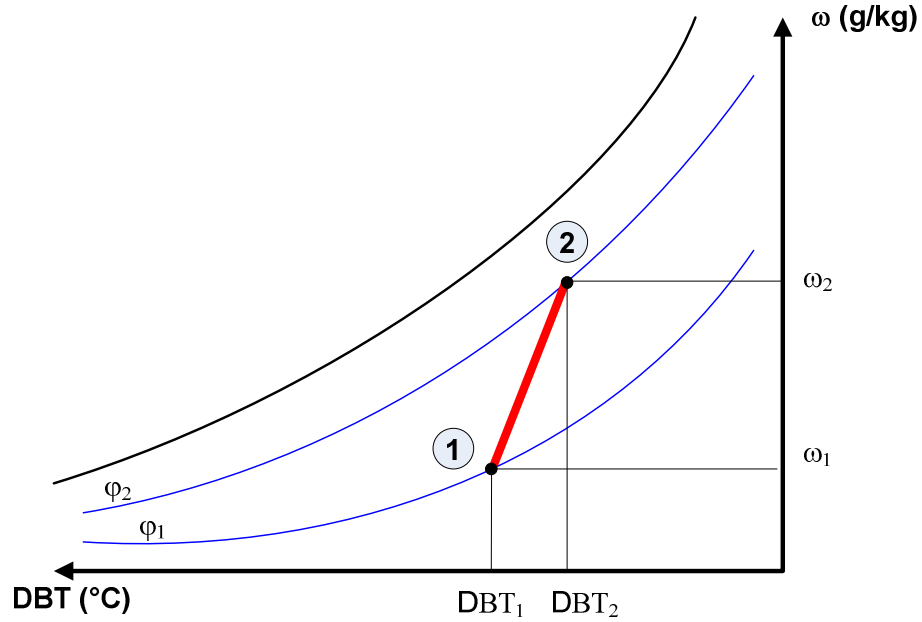
4.1.2 Buharlaştırma Enerjisinin Egzoz Gazlarından Karşılanabilirliğinin Araştırılması

Suyun buharlaştırılması için gerekli enerjinin egzoz gazı ile atılan enerji ile karşılanıp karşılanamayacağı araştırılmıştır. Aynı zamanda emme havasına katılan buharın ısı nedeniyle emme havası sıcaklığındaki artışın, NO_x emisyonu üzerindeki etkisi ayrıca deneysel olarak tespit edilmiştir.

4.1.2.1 Nemlendirme İçin Gerekli Isı

Emme havasının nemlendirilmesinde kullanılan suyun buharlaştırılması için gerekli ısının egzoz gazının enerjisinden karşılanıp karşılanamayacağının belirlemek amacıyla teorik ve deneysel kısımlardan oluşan ek bir çalışma yapılmıştır.

Bu ek çalışmada, emme havasının ölçülen şartlarda nemlendirilmesi için gerekli özgül nem değeri, emme havasının buhar jeneratöründen önce (1) ve sonraki şartları (2) psikrometrik diyagram üzerinde işaretlenerek Şekil 4.2 belirlenmiştir.



Şekil 4.2 Emme havasının nemlendirilmesi

$$Q = Q_{duyulur} + Q_{gizli} \quad (4.5)$$

$$Q_{duyulur} = m_{su} \cdot c_p \cdot \Delta t \quad (4.6)$$

$$Q_{gizli} = m_{su} \cdot hfg \quad (4.7)$$

$$m_{su} = m_{hava} \cdot \frac{\Delta w}{(1 + w_1)} \quad (4.8)$$

$$\Delta w = w_2 - w_1 \quad (4.9)$$

$$\Delta t = (t_{kaynama} - t_{ortam}) \quad (4.10)$$

Özgül nem değeri ve deneylerde ölçülen emme havası debisi kullanılarak; (4.8) ve (4.9) eşitliklerinden buharlaştırılacak su debisi, (4.6) ve (4.7) eşitliklerinden suyun buharlaştırılması için gerekli duyulur ve gizli ısı hesaplanmıştır.

4.1.2.2 Egzoz Gazları ile Motordan Yayılan Isının Hesaplanması

Egzoz gazları ile motordan yayılan ısı, egzoz debisi ve emisyon oranlarına göre değişim göstermektedir. Egzoz gazı analizinden gaz karışımının özgül ısınma ısısı ve kinematik viskozitesi hesaplanarak, ölçülen egzoz gazı sıcaklık ve debisinde motordan yayılan ısı hesaplanmıştır.

$$Q_{egzoz} = m_{egzoz} \cdot c_{p-egzoz} \cdot \Delta t \quad (4.11)$$

$$\Delta t = (t_{egzoz} - t_{ortam}) \quad (4.12)$$

Egzoz gazlarının ısıl kapasitesi ile nemlendirme için gerekli ısının karşılaştırılmasına sonuçlar ve öneriler bölümünde yer verilmiştir.

4.2 Materyaller

4.2.1 Buhar Üreteci

- Buhar üreteci, galvaniz sac malzemedan silindirik bir hazneye sahip olacak şekilde imal edilmiştir. Silindirik haznenin;

Çizelge 4.1 Buhar üretecinin teknik özellikleri

| | |
|-------------------------|-------------|
| Taban yarıçapı | 100mm |
| Haznenin yüksekliği | 250mm |
| Et kalınlığı | 2mm |
| Toplam efektif hacmi | 7,850 litre |
| Rezistans kapasitesi | 2 kW |
| Buhar debisi (maksimum) | 0,018kg/s |
| Termostat | 16A |

Hazne içersine 2kW gücünde bir adet rezistans monte edilmiştir. Üretecin güç kontrolü variac ile sağlanmıştır. Yapılan ölçümler sonucu tam kapasite ile çalışma durumunda buhar üretecinin emme havasına sağlayabileceği maksimum buhar debisi 0,018kg/s olarak ölçülmüştür (Çizelge 4.1).

Buhar üretecine, ısıtıcı gücünü kontrol edebilmek ve bu sayede hazne içersindeki suyu sürekli buharlaşma fazında tutabilmek amacı ile termostat monte edilmiştir. Termostat, hazne içersindeki suyun sıcaklığının 70°C ila 90°C arasında tutulmasını sağlamıştır.

- Deponun üst kısmına 60mm ve 19mm çapında iki çıkış temin edilmiştir.
- Çıkışlardan 60mm'lik olanı yarım parmak küresel vana ile 0,6bar basınca ve 165°C'ye dayanıklı buhar borusu aracılığı ile emme kanalına kelepçeler vasıtasıyla bağlanmıştır.



Şekil 4.3 Buhar jeneratörü (üretici), termostat üstten görünüşü

- Üretcin emme kanalına bağlantı kısmına T borusu monte edilerek cihazın deney düzeneğinin uygun bölgesine yerleştirilmesi sağlanmıştır.
- 19mm'lik çıkışına ise ½" küresel vana ilavesi ile deney süresince eksilen suyun temini ve atmosfere çıkış sağlanmıştır.
- Suyun buharlaşması esnasında sıcaklığının belli bir aralıkta sabit kalmasını sağlamak amacı ile üzerinden 16A'lık akım iletebilen bir termostat kullanılmıştır. Termostat üretcin yerleştirildiği panel üzerine monte edilmiştir (Çizelge 4.1).
- Termostat, rezistans ve şehir şebekesi bağlantısı ısıya dayanıklı silikon 2mm'lik kablolarla yapılmıştır.
- Nemlendirilmiş havanın silindire girmeden önceki kısmındaki boruda nem ölçme sensörünün girebileceği genişlik ve derinlikte ek boru kaynak yapılmıştır.
- Üretcin ısı kaybının minimum olması açısından; buhar borusu da içinde yoğuşma olmaması açısından cam yünü ile izole edilmiştir.
- Sıcaklık değerlerinin ölçümü için emme manifoldu önündeki nozül çıkışına, egzoz manifoldundaki nozül çıkışına ve EGR bağlantısının olduğu yani emme havası-egzoz karışımının bağlantı yerine termokupuller yerleştirilmiştir. Değerler dijital göstergeli panodan okunacaktır.



Şekil 4.4 Buhar jeneratörü (üreteci) yandan görünüşü

4.2.2 Deney Motoru

Çizelge 4.2 Deney motorunun teknik özellikleri

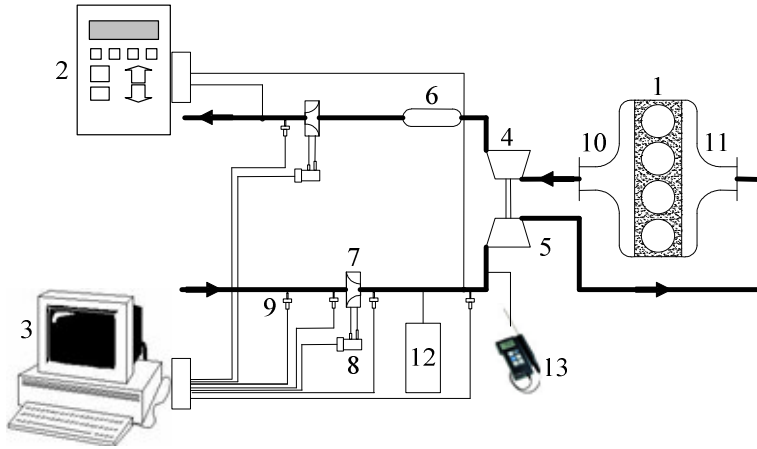
| | |
|------------------|--|
| Motor tipi | 4 Stroklu, indirekt enjeksiyonlu Diesel motoru |
| Silindir hacmi | 1,753 litre |
| Silindir sayısı | 4 |
| Sıkıştırma oranı | 21,5:1 |
| Maksimum güç | 44 kW (4800d/d) |
| Maksimum tork | 110Nm (2500d/d) |

4.2.3 Hassasiyet ve Kalibrasyon Yöntemi

Çizelge 4.3 Gaz analiz cihazının teknik özellikleri

| Gaz analiz cihazı | Ölçülen parametreler | Ölçüm aralığı | Hassasiyet |
|-------------------------|----------------------|---------------|------------|
| Krom Schröder RGA 33 | CO | 0-4500ppm | 300ppm %5 |
| | CO ₂ | %0-20 | %0,01 |
| | HC | 0-3000ppm | 1ppm |
| | NO _x | 0-4500ppm | 300ppm %5 |
| | O ₂ | %0-20 | %0,1 |

4.2.4 Deney Düzenegi



Şekil 4.5 Deney düzeneginin şematik şekli

| | |
|-----|-------------------|
| 1. | Motor |
| 2. | Gaz analiz cihazı |
| 3. | Bilgisayar |
| 4. | Türbin |
| 5. | Kompresör |
| 6. | Dinlendirme odası |
| 7. | Nozül |
| 8. | Basınç sensörü |
| 9. | Termokupul |
| 10. | Egzoz manifoldu |
| 11. | Emme manifoldu |
| 12. | Buhar jeneratörü |
| 13. | Higrometre |

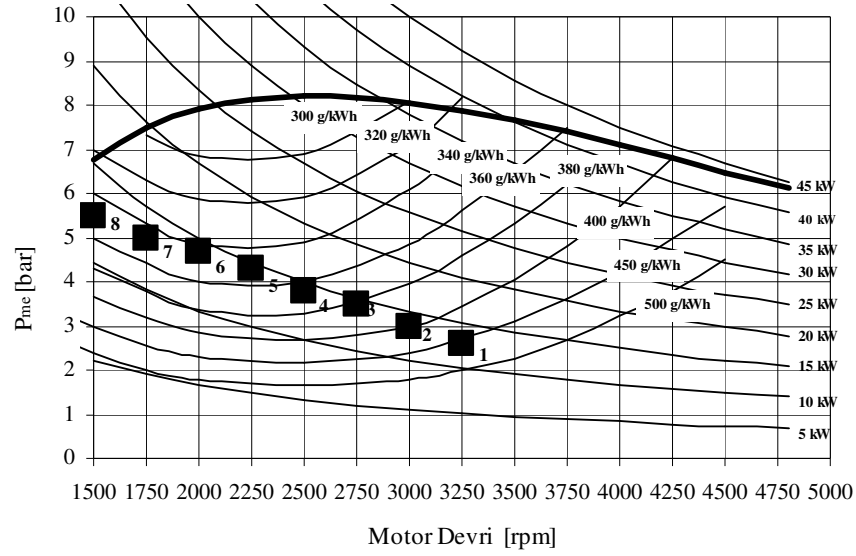
4.3 Deneysel Çalışma

Deney, kısmi yük altındaki motorun sekiz farklı çalışma şartında, farklı emme sıcaklıklarında yapılmıştır. Her ölçüm noktası için, emme havasına katılan buhar miktarı artırılarak emme havası nemlendirilmiş ve egzoz sıcaklığı, emme havası debisi, emme manifoldundaki karışımın sıcaklığı ve bağıl nemi devir sayısı, motor yükü, yakıt tüketimi, egzozdan atılan CO, CO₂, NO_x, O₂ konsantrasyonu, λ ölçülmüş ve emme havasındaki ki bağıl nem değişimine göre deney motorunun tork, güç, özgül yakıt tüketimi, NO_x, egzoz sıcaklığı, hava fazlalık katsayısı, emme havasının sıcaklığı değişimlerini gösteren grafikler çizilmiştir.



Şekil 4.6 Deney düzeneği kontrol paneli

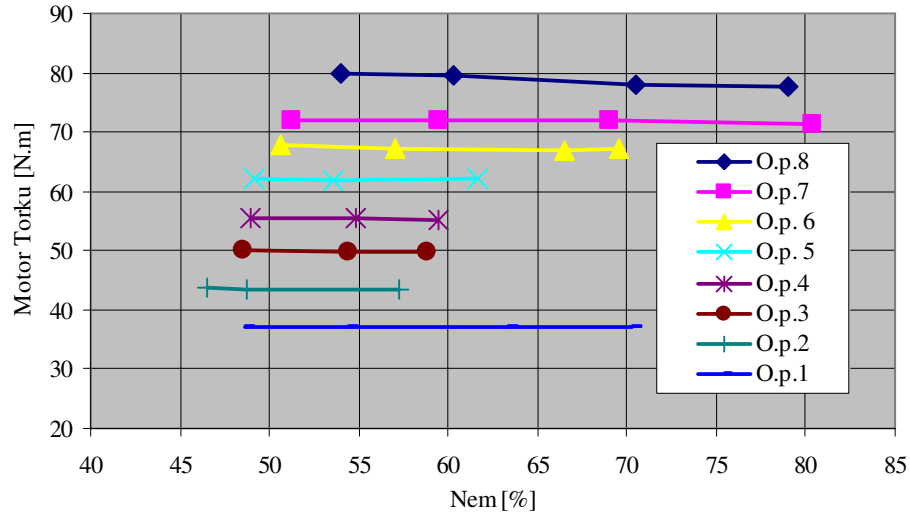
4.3.1 Çalışma Noktaları ve Ölçüm Sonuçları



Şekil 4.7 Motor haritası ve çalışma yapılan noktalar

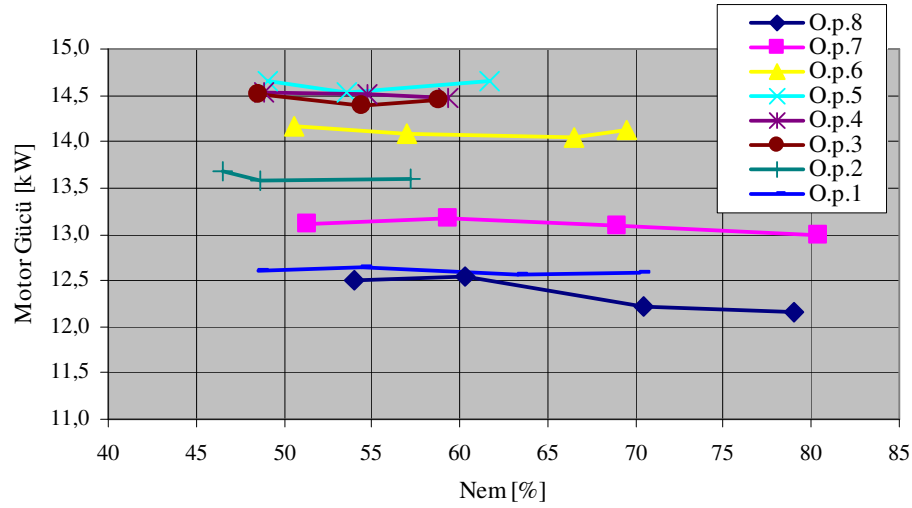
Çizelge 4.4 Çalışma noktaları ve ölçüm sonuçları

| Çalışma Noktaları | Devir(d/d) | P _{me} (bar) |
|-------------------|------------|-----------------------|
| O.p.1 | 3233 | 2,59 |
| | 3227 | 2,59 |
| | 3248 | 2,59 |
| | 3234 | 2,59 |
| O.p.2 | 2987 | 3,03 |
| | 2982 | 3,03 |
| | 2984 | 3,05 |
| O.p.3 | 2771 | 3,47 |
| | 2761 | 3,47 |
| | 2768 | 3,49 |
| O.p.4 | 2505 | 3,85 |
| | 2496 | 3,87 |
| | 2502 | 3,87 |
| O.p.5 | 2254 | 4,33 |
| | 2245 | 4,31 |
| | 2253 | 4,33 |
| O.p.6 | 2008 | 4,69 |
| | 2004 | 4,67 |
| | 2001 | 4,69 |
| | 1997 | 4,73 |
| O.p.7 | 1738 | 4,98 |
| | 1737 | 5,02 |
| | 1748 | 5,02 |
| | 1740 | 5,02 |
| O.p.8 | 1493 | 5,42 |
| | 1495 | 5,44 |
| | 1507 | 5,55 |
| | 1496 | 5,57 |



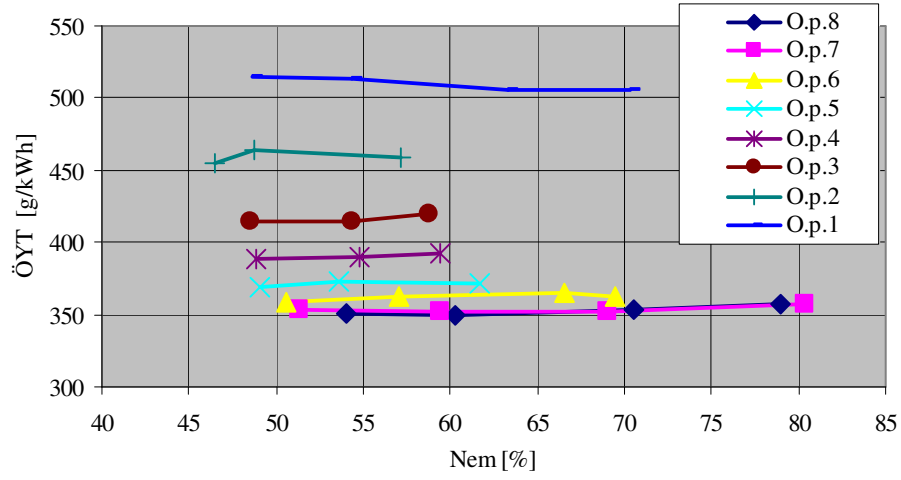
Şekil 4.8 Emme havasının nemlendirilmesinin motor momentine etkisi

Şekil 4.8’de emilen havanın nemlendirilmesinin, motor momenti üzerinde kayda değer bir farklılık meydana getirmediği görülmektedir.



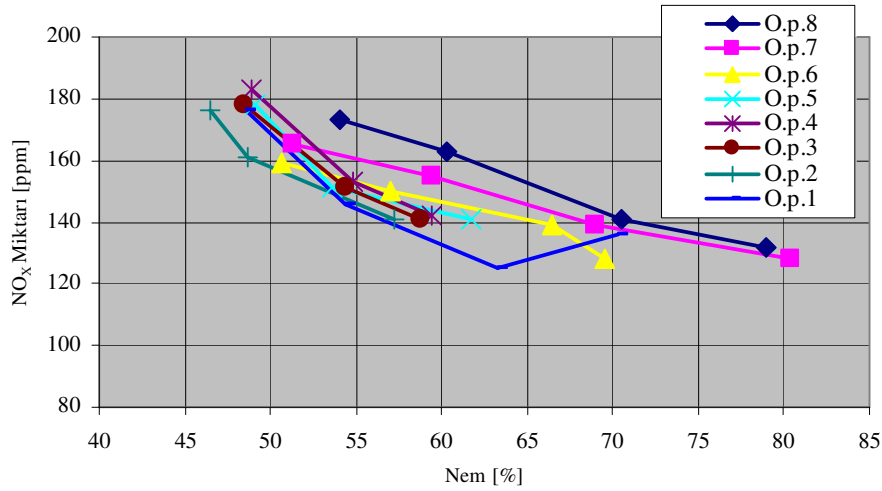
Şekil 4.9 Emme havasının nemlendirilmesinin motor gücüne etkisi

Şekil 4.9’da Silindire sokulan emme havasının tuttuğu nem miktarının artırılması motor gücü üzerinde olumsuz bir etki oluşturmamıştır.



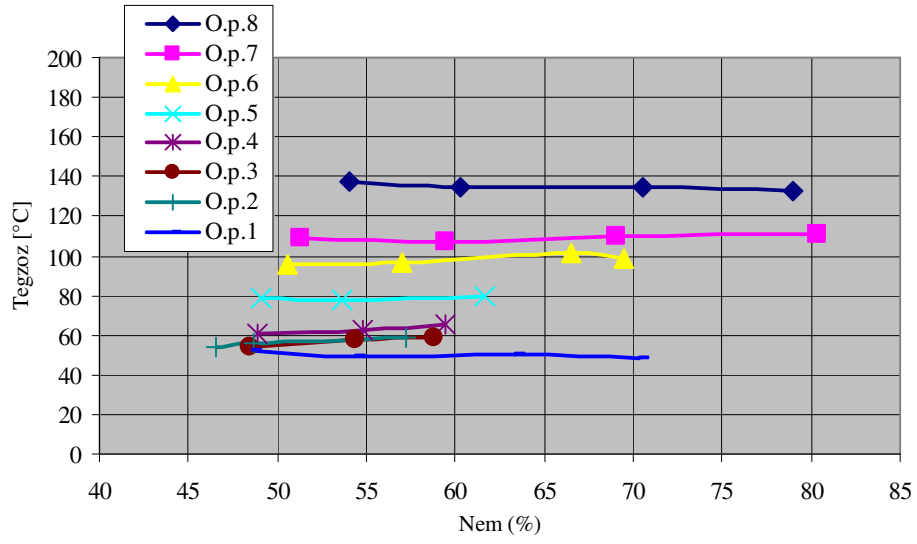
Şekil 4.10 Emme havasının nemlendirilmesinin özgül yakıt tüketimine etkisi

Şekil 4.10'da nemlendirme işlemi motorun özgül yakıt tüketimini olumsuz yönde etkilememiştir.



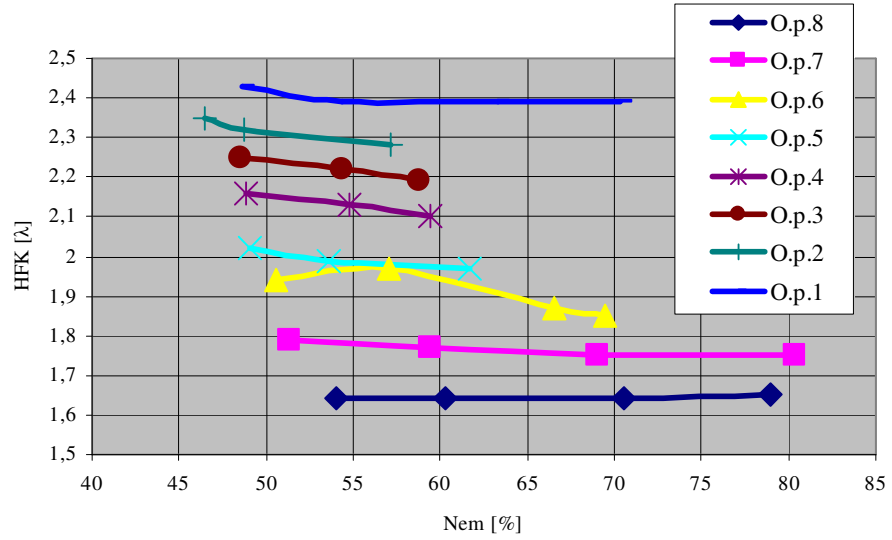
Şekil 4.11 Emme havasının nemlendirilmesinin NO_x oluşumuna etkisi

Şekil 4.11'de Nemlendirmenin NO_x oluşumunu azaltma etkisi açıkça görülmektedir.



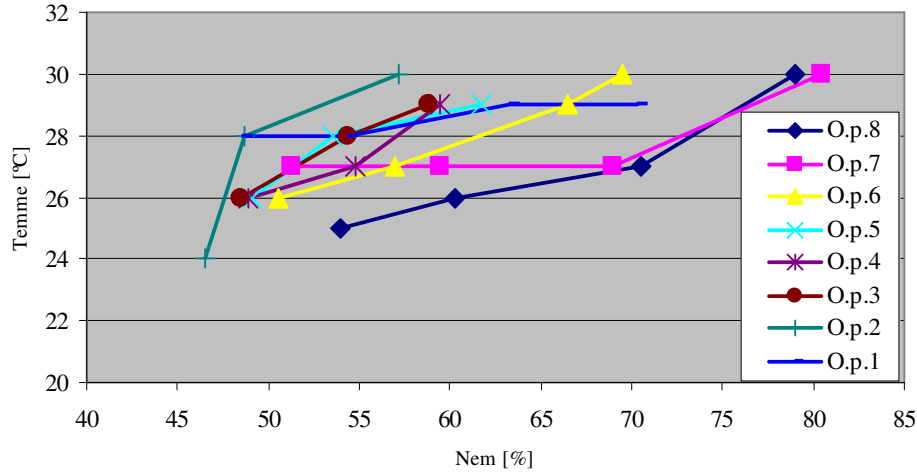
Şekil 4.12 Nemlendirmenin egzoz sıcaklığına etkisi

Silindir içersine gaz fazında su ilavesinin egzoz sıcaklıklarını önemli ölçüde etkilemediği Şekil 4.12’de görülmektedir.



Şekil 4.13 Nemlendirmenin hava fazlalık katsayısına etkisi

Şekil 4.13’te nemlendirmenin hava fazlalık katsayısını sürekli düşürme yönünde etkilediği görülmektedir.



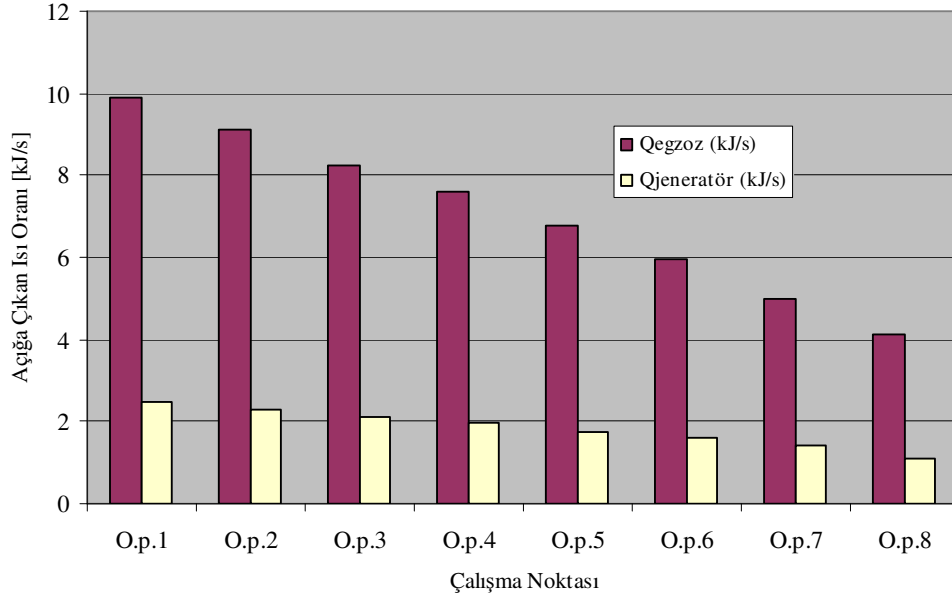
Şekil 4.14 Nemlendirmenin emme havası sıcaklığına etkisi

Şekil 4.14'te emme havasının buhar ile nemlendirilmesi sonucu emme havası sıcaklığındaki artış açıkça görülmektedir.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Emme havasının sahip olduğu nem, ısı kapasitesi nedeniyle NO_x emisyonunu azaltıcı yönde önemli bir etkiye sahiptir. Düşük emisyonlu motorların üretilmesi için bu doğal avantajın mümkün mertebe kullanılması gerekir. Özellikle düşük neme sahip iklim bölgelerinde uygulama daha etkili olacaktır.

Teorik olarak, emme havası sınır şartlardan daha fazla nemlendirilemeyeceğinden nem kontrolü için ayrı bir sistemin kullanılmasına gerek yoktur. Bu durum kullanım kolaylığı ve maliyet açısından avantaj sağlamaktadır. Emme havasının nemlendirilmesi için gerekli enerjinin egzoz gazında fazlasıyla bulunması, buharlaştırılacak suyun ön ısıtmasının motorun soğutma sisteminden karşılanabilmesi, bu prensibe göre çalışacak bir sistemin ek enerji gereksinimi de ortadan kaldırırken işletme maliyetini de azaltacaktır (Şekil 4.15).



Şekil 4.15 Nemlendirme için gerekli ısı ile egzozdan atılan ısının karşılaştırılması

Yapılan deneylerde, emme havasının sınır şartlara kadar nemlendirilmesiyle NO_x emisyonunda %19-29 mertebelerinde bir azalma sağlandığı görülmüştür. NO_x emisyonundaki bu azalma, egzoz emisyonlarının yanma sonrası iyileştirilmesine de önem bir katkı sağlayacaktır.

Sistemin avantajları yanı sıra uygulama bir takım zorlukları da mevcuttur. Öncelikle nemlendirme için gerekli suyun temini gerekmektedir. Bu sorun suyun depolanması veya stasyonel motorlara bir su besleme hattı bağlanması ile çözülebilir. Diğer bir sorun, egzoz enerjisinden mümkün mertebe yararlanmak için buhar jeneratörünün egzoz sisteminin içerisine veya hemen üzerine bağlanmasıdır. Bu konstrüktif açıdan zorluk içermekle birlikte uygulanabilir bir yöntemdir. Elde edilen buharın yoğunlaşmadan emme havasına katılması, buharın ilerlediği kanalların iyi izole edilmesini gerektirmektedir. Yoğuşmanın önlenmesi, motorda suyun neden olduğu korozyonun engellenmesi açısından önemlidir.

KAYNAKLAR

Bedford, I.vd., (2000) "Effects of Direct Water Injection on DI Diesel Engine Combustion", SAE Technical Paper Series 2000-01-2938.

EPA Draft Technical Report, (2002), "Impacts of Lubrizol's PuriNO_x Water/Diesel Emulsion on Exhaust Emissions from Heavy-Duty Engines", December, 2002, EPA 420-P-02-007.

EPA Technical Bulletin, (1999), "Nitrogen Oxides (NO_x), Why and How They Are Controlled", November, 1999, Research Triangle Park, NC 27711.

ESI International Report, (1999) "Diesel Emission Control Strategies Available to the Underground Mining Industry", February 24, 1999, 1660 L. Street NW Suite 1100, Washington DC 20036.

Ghaffarpour, M. ve Baranescu, R. (1996) "NO_x Reduction Using Injection Rate Shaping and Intercooling in Diesel Engines", SAE Technical Paper Series 960845.

Hoard, J., (2000) "Comparison of Plasma-Catalyst and Active Lean NO_x Catalyst", August 20, 2000.

Kegl, B., ve Pehan, S., (2001) "Reduction of Diesel Engine Emissions by Water Injection", SAE Technical Paper Series 2001-01-3259.

Levendis, A. ve Pavlatos, I. (1994) "Control of Diesel Soot, Hydrocarbon and NO_x Emissions with a Particulate Trap and EGR", SAE Technical Paper Series 940460.

MECA, (2000), "Catalyst-Based Diesel Particulate Filters and NO_x Adsorbers: A Summary of the Technologies and the Effects of Fuel Sulfur", August 14, 2000, 1660 L. Street NW Suite 1100, Washington DC 20036.

MECA Status Report, (1997), "Emission Control Technology for Stationary Internal Combustion Engines", July, 1997, 1660 L. Street NW Suite 1100, Washington DC 20036.

Murakami, A. (1997) "An Attempt of Moving Bottom Auxillary Combustion Chamber to Reduce Diesel Particulate and NO_x", SAE Technical Paper Series 970316.

Nakagawa, H., (1996) "Reduction of Exhaust Emission with New Water Injection System in a Diesel Engine", SAE Technical Paper Series 960033.

Nehmer, D.A. ve Reitz, R.D. (1994) "Measurement of the Effect of Injection Rate and Split Injectors on Diesel Engine Soot and NO_x Emissions", SAE Technical Paper Series 9400668.

Odaka, M., (2002) "Effects of EGR with a Supplemental Manifold Water Injection to Control Exhaust Emissions from Heavy-Duty Diesel Powered Vehicles", SAE Technical Paper Series 910739.

Ohashi, H.vd., (1995) "Significant NO_x Reductions with Direct Water Injection into the Sub-Chamber of an IDI Diesel Engine", SAE Technical Paper Series 950609.

Peter, E., (2001), "Critical Topics in Exhaust Gas Aftertreatment", Research Studies Press Ltd., England.

Union of Concerned Scientists, (1999) "Diesel Passenger Vehicles and the Environment", April, 1999, 2397 Shattuck Avenue, Suite 203 Berkeley, CA 94704.

İNTERNET KAYNAKLARI

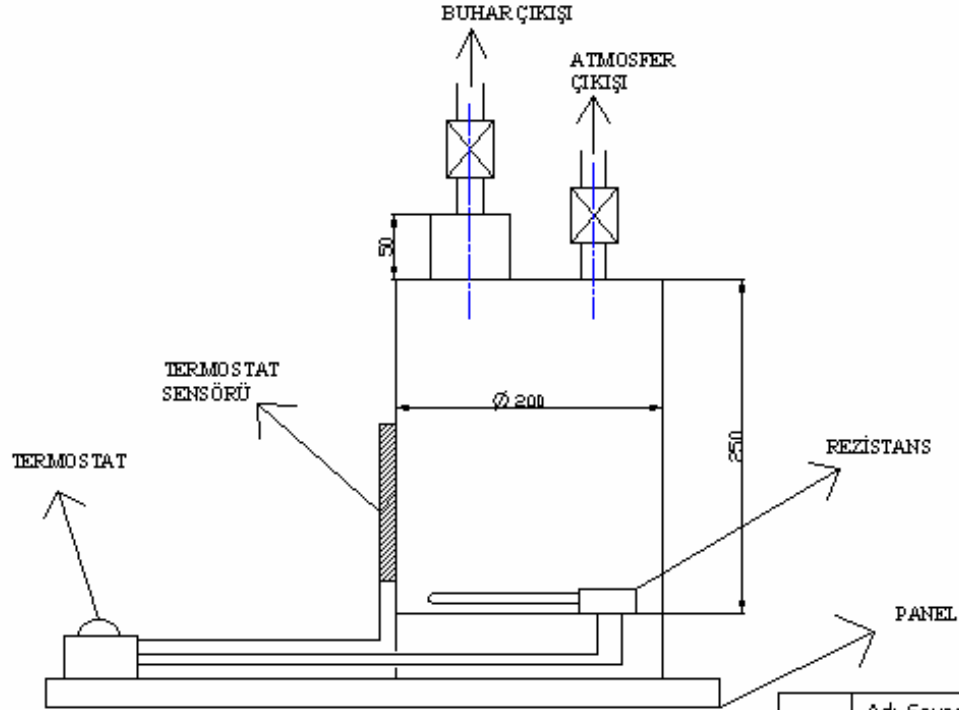
“Facts on NO_x Reduction”, GP04-40 (060904)

[1] www.epa.gov

[2] www.dieselforum.org

[3] www.dieselnet.com

[4] www.uti.com.il



| Ççek | Adı-Soyadı | Numarası | Tarih | Malzeme |
|----------------------|-------------|----------|------------|---------|
| | Emrah Boluk | 03521010 | 02.05.2005 | |
| Buhar Üretici Seması | | | | |

ÖZGEÇMİŞ

| | | |
|--------------|------------|--|
| Doğum tarihi | 01.01.1979 | |
| Doğum yeri | İstanbul | |
| Lise | 1993-1997 | Kabataş Erkek Lisesi |
| Lisans | 1998-2003 | Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fak. Makine Mühendisliği Bölümü |

Çalıştığı kurum(lar)

2004-Devam ediyor Şenlikoğlu İnoks Kimya Tesisleri A.Ş