



## EMİSYON DENEY LABORATUVARI

### AMAÇ

Bu laboratuvar deneyinin amacı, araçlarda meydana gelen emisyon gazlarını tanımak ve bu gazların azaltılması için geliştirilen sistemleri anlamaktır.

### KAVRAMLAR

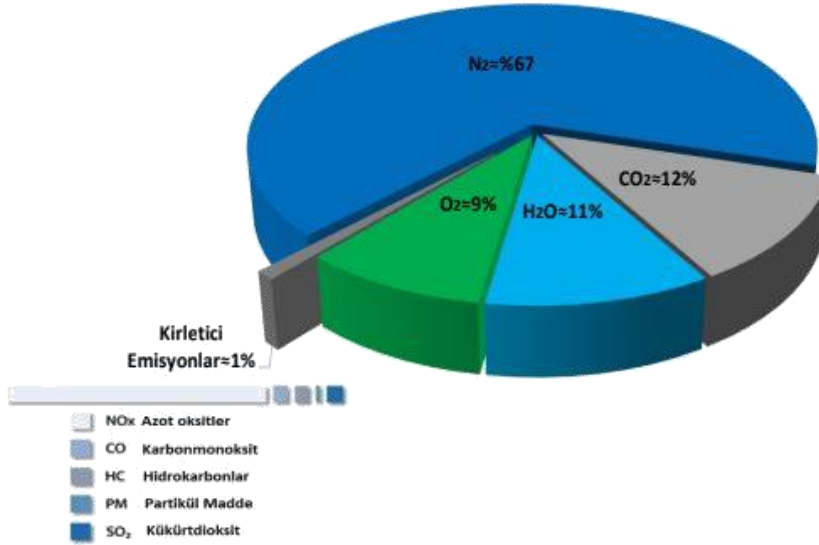
- Emisyon
- Dizel motorlar / NO<sub>x</sub> gazları
- SCR sistemi

### ÖĞRENME ÇIKTILARI

- a. Emisyon gazları (HC,NO<sub>x</sub>,CO), SCR, DOC, DPF, katalist üretimi gibi kavramlarını bilir,
- b. Deneysel verileri amaç doğrultusunda analiz eder ve yorumlar,
- c. Deneysel sonuçları bir rapor halinde sunar.,

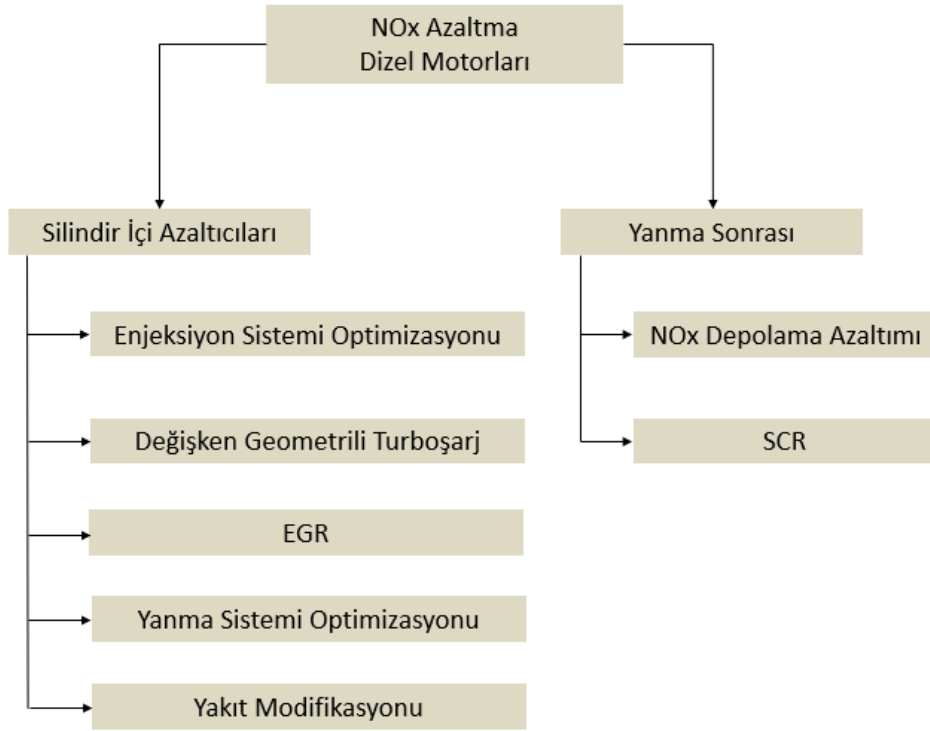
### GENEL BİLGİ

İçten yanmalı motorlarda fosil yakıtların yakılması, çevreye istenmeyen, zararlı gazların (egzoz emisyonları) salınmasına yol açmıştır. Bu zararlı gazlar, insan sağlığının bozulmasına ve diğer canlıların zarar görmesine neden olan hava kirliliğinin temel nedenlerinden biridir. Egzoz emisyonlarının salınımında toplu taşıma araçları, yük taşımacılığı ve iş makinaları sektörünün payının oldukça yüksek olduğu bilinmektedir. Bu sektörlerdeki araçların büyük çoğunluğunda dizel motorlar kullanılmıştır. Dizel motorlarda kullanım koşullarına bağlı olarak egzoz gazı bileşenleri %67 N<sub>2</sub>, %12 CO<sub>2</sub>, %11 H<sub>2</sub>O, %9 O<sub>2</sub> gibi zararsız emisyonların yanı sıra %1'den az zararlı emisyonlardan oluşmaktadır. Dizel motorlardan kaynaklanan zararlı gazların çoğu karbon monoksit (CO), hidrokarbon (HC), nitrojen oksitler (NO<sub>x</sub>) ve partikül madde (PM) emisyonlarıdır. Bu zararlı emisyonların %50'den fazlası NO<sub>x</sub> oluşturmaktadır. NO<sub>x</sub>, hava kirliliğiyle doğrudan ilişkili nitrojen oksitlerin genel adıdır ve yaklaşık %5 nitrojen dioksit (NO<sub>2</sub>) ve %95 nitrik oksit (NO) içerir. Ayrıca bazen nitröz oksit (N<sub>2</sub>O) ve dinitrojen trioksit (N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), dinitrojen trioksit (N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) ve dinitrojen pentoksit (N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) gibi diğer nitrojen oksitleri de içerir. Bu gazlar arasında N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>'den 298 kat daha yüksek küresel ısınma potansiyeline sahip ciddi bir sera gazıdır. Aynı zamanda stratosferik ozon tahribatına da karışmıştır. Ayrıca fotokimyasal duman, asit yağmuru ve ozon tabakasının incelmesinin başlıca kaynakları olarak kabul edilen NO ve NO<sub>2</sub>, çevreye ve tüm canlılara zararlıdır. Ayrıca nefes alırken akciğerlerde nitrik asit oluşturarak akciğer ödemeine yol açabileceğinden tüm canlılara doğrudan zarar verirler.



### Zararlı gazlar

Motorlu taşıtlardan kaynaklanan çevre kirliliğinin azaltılması için dünyada uyulması gereken egzoz emisyon standartları bulunmaktadır. Avrupa'da egzoz emisyon standartlarına ilişkin ilk yasa 1970 yılında çıkarılmıştır. Zaman içerisinde araç sayısının artması nedeniyle egzoz emisyon standartları sıkılaştırılarak kirlenici emisyonların en aza indirilmesi hedeflenmiştir. Tüm emisyon azaltma gereklilikleri, dizel motorlardan kaynaklanan karbon monoksit ve yanmamış hidrokarbonları da sınırlar; ancak asıl sorun NO<sub>x</sub> ve PM emisyonlarıdır. Zorunlu kriterlerin karşılanması amacıyla dizel motorlarda emisyonların azaltılmasına yönelik birçok çalışma yapılmıştır. Dizel motorlarda en sorunlu emisyon olan NO<sub>x</sub> emisyonlarının olumsuz etkilerini azaltmak için kullanılan yöntemler silindir içi ve yanma sonrası olmak üzere iki kategoride sınıflandırılabilir. Silindirdeki NO<sub>x</sub> azaltımı genellikle yanma prosesi için yakıt katkılarının kullanılmasıyla yakıt modifikasyonunu içerir. Dizel motorlarda yanma, silindir içindeki havanın yüksek basınçta sıkıştırılması sırasında yakıtın basınçlı havaya püskürtülmesiyle meydana gelir. Hava-yakıt karışımının oluşumu ve yanma, dizel motorların yanma sürecinin karmaşık ve heterojen olması nedeniyle yakıt enjeksiyonu, sprey oluşumu ve yakıt atomizasyonu gibi yakıt enjeksiyon parametrelerinin hassas bir şekilde kontrol edilmesini gerektirir. Dizel motorlardan kaynaklanan NO<sub>x</sub> emisyonlarını kontrol etmeyi amaçlayan farklı yaklaşımlar Şekil'de gösterilmektedir.



Dizel motorlar için NOx emisyonlarını kontrol etmeye yönelik çeşitli yaklaşımlar

Yanma odası tasarımı optimizasyonu, enjeksiyon sistemi tasarımı, egzoz gazı devridaimi (EGR) ve değişken takviye basıncının, dizel motorlardan kaynaklanan NOx ve PM emisyonlarında önemli azalmalar sağladığı bulunmuştur. Bununla birlikte, NOx ve PM'nin eş zamanlı azaltılması en büyük zorluğu oluşturmaktadır çünkü silindir azaltma tekniklerinin çoğu NOx'i azaltma eğilimindeyken PM'yi artırma eğilimindedir ve bunun tersi de geçerlidir. Ayrıca, silindir içi NOx azaltma teknikleri için benimsenen motor modifikasyonlarının çoğu, yakıt tüketiminde artışa neden olmaktadır. Bu durumlara birkaç örnek vermek gerekirse enjeksiyon zamanlamasının geciktirilmesi NOx oluşumunun azaltılmasında etkili olabilir ancak genel olarak yakıt tüketiminin artmasına ve PM emisyonlarının artmasına neden olur. Benzer şekilde, yakıt enjeksiyon basıncı arttıkça PM emisyonlarını azaltabilir ancak aynı zamanda daha yüksek NOx emisyonlarına da yol açabilir. EGR uygulaması NOx emisyonlarını azaltmayı amaçlasa da PM emisyonlarını artırıyor ve aynı zamanda EGR'nin yüksek basınçta kullanılması yakıt tüketimini artırıyor. Turboşarjlı motorlar, motor dinamik tepkisinde ve motor gücünde iyileşmenin yanı sıra egzoz emisyonlarında ve yakıt tüketiminde azalma sağlar. Enjeksiyon zamanlaması turboşarjla geciktirilebildiğinde NOx emisyonları azaltılabilir. Turboşarjdan gelen takviyeli hava şarjının soğutucu yardımıyla soğutulması sayesinde NOx emisyonlarının azaltılması daha da artırılır. Ancak PM emisyonu, yüksek hava fazlalığı ve genel olarak yüksek yanma sıcaklıkları nedeniyle meydana gelir. Öte yandan, egzoz son işlem sistemleri olarak adlandırılan yanma sonrası



teknikler, motor performansını etkilemeden NO<sub>x</sub> ve PM emisyonlarını etkili bir şekilde azaltabilmektedir. Ayrıca yukarıda anlatılan sistemlerde olduğu gibi NO<sub>x</sub> ve PM arasında denge ilişkisi yoktur ancak maliyet ve ilave alan açısından dezavantajlıdır. NO<sub>x</sub> azaltımı için seçici katalitik indirgeme (SCR) ve NO<sub>x</sub> depolama-indirgeme (NSR) sistemleri ve PM azaltımı için dizel partikül filtreleri (DPF'ler) kullanılmıştır. NO<sub>x</sub> emisyonlarının azaltılmasına yönelik teknikler arasında en yüksek verimliliğe sahip sistemlerden biri olan SCR sistemidir. Ayrıca dolaylı olarak yakıt tüketim oranını da azaltır. Motor yüksek yanma sıcaklığıyla çalıştırıldığında, yakıt tüketimi ve PM emisyonlarının düşük olmasına yol açar ancak NO<sub>x</sub> üretimini artırır. Daha sonra artan NO<sub>x</sub> emisyonları SCR sistemi ile egzoz gazından uzaklaştırılır. Bu durum yakıt tüketim potansiyelinin iyileşmesine yol açmaktadır.

### **DİZEL MOTOR EMİSYONLARI**

#### **Hidrokarbonlar (HC)**

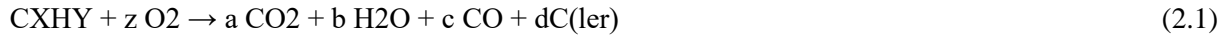
HC emisyonları, yakıtın yetersiz yanmasından kaynaklanan eksik yanma ürünleridir. HC oluşumunun temel nedeni silindir içi sıcaklıkların yetersiz olması veya oksijen eksikliği nedeniyle yanmanın tam olarak gerçekleşmemesidir. HC emisyonları alkenler, alkanlar ve aromatikler gibi çok sayıda türden oluşur. Dizel motorlar tamamen fakir karışımla çalıştıklarından benzinli motorlara göre daha az HC emisyonu yayarlar. Dizel yakıttaki bileşenlerin molar ağırlığının büyük olması nedeniyle, dizel yakıtın kaynama ve yoğunlaşma sıcaklıkları da yüksektir. Bu durum yanma sırasında oluşan katı karbon kurum yüzeyinde bazı HC parçacıklarının yoğunlaşmasını kolaylaştırır. Karışım ve yanma süreci devam ederken bunların çoğu yanar. Bu karbon kurumunun yalnızca küçük bir kısmı egzoz yoluyla silindirden dışarı atılır. Karbon parçacığının yüzeyinde yoğunlaşan HC bileşenleri motorda HC emisyonlarına neden olur. Dizel motor genellikle %98 civarında bir yanma verimliliğine sahiptir ve egzozda emisyon olarak yalnızca %2 civarında HC yakıt bulunur. Silindir içerisinde yanmanın istenildiği gibi gerçekleşmeyeceği çok zayıf karışım alanları olacağı gibi bazı noktalarda karışımın tamamını yakacak oksijenin bulunmadığı çok zengin karışım alanları da bulunacaktır. Heterojen karışım eksik yanmanın nedeni olabilir. Dizel motorlarda karışım bölgeleri çok zenginden çok fakire kadar çok değişkenlik göstermekte ve aynı zamanda birçok alev cephesi oluşmaktadır. Karışımın yetersiz olması sonucunda zengin karışım bölgelerindeki bazı yakıt parçacıkları reaksiyona girecek oksijeni bulamazlar. Fakir karışımli bölgelerde yanma sınırlı olduğundan yakıtın bir kısmı yanmadan kalabilir. Aşırı karışım durumunda bazı yakıt parçacıkları yanmış gaza karıştığı için tam olarak yanmaz. Böylece dizel motorlarda HC emisyonları ortaya çıkar. Dizel motorlarda yakıt özellikleri, enjektörler, çatlak hacmi, yağ filmi emilimi ve duvar birikintisi emilimi hidrokarbon emisyonlarını etkileyen faktörlerdir. Yanmamış hidrokarbon (UHC) emisyonları ve türevleri kolaylıkla buharlaşma eğiliminde



olduklarından uçucu organik bileşikler (VOC'ler) olarak da adlandırılırlar. Fotokimyasal duman, atmosferde güneşin ultraviyole radyasyonunun varlığında VOC'ler ve nitrojen oksitler arasındaki reaksiyonların neden olduğu kahverengimsi gri bir sis tabakasıdır. Fotokimyasal dumanın hoş olmayan bir kokusu var. Ayrıca VOC'lerin güneş ışığı varlığında nitrojen oksitlerle reaksiyonu sonucunda güçlü bir oksitleyici olan ozon oluşur. Suyun sterilize edilmesinde ve ağartılmasında kullanılır. Stratosferde güneşin ultraviyole ışınlarına karşı kalkan görevi görür. Ancak yer seviyesindeki ozon, yüksek oksitleyici özelliğinden dolayı gözler, akciğerler ve diğer biyolojik dokular için tehlikelidir. Üstelik bitkilere zararlıdır.

## **Partikül Madde (PM)**

Partikül madde (PM) emisyonları dizel motorlar için en sorunlu ve kirletici emisyon türüdür. Dizel motorların egzoz gazlarında, yanma sırasında silindir içindeki yakıt açısından zengin bölgelerde katı karbon kurum parçacıkları oluşur. Yakıt açısından zengin, oksijen eksikliği olan bölgelerde, karbonun tamamı CO<sub>2</sub>'ye dönüşemediğinden silindir içerisinde kurum parçacıkları oluşur.



Daha sonra silindir içindeki bileşenleri karıştıracak türbülans ve kütle hareketleri sonucunda yeterli oksijenle reaksiyona giren bu karbon parçacıklarının %90'dan fazlası silindir içinde CO<sub>2</sub>'ye dönüşür. Dizel motorlardan yayılan PM emisyonları, çapı 2,5 µm'den küçük parçacıklara sahiptir ve toplam parçacık maddenin ağırlıkça %90'ından fazlasını oluşturur. Dizel motorlardan kaynaklanan PM emisyonlarının içeriği yanmamış kurum, kısmen yanmış yakıt, çözünebilir organik fraksiyon (SOF), yanmadan kaynaklanan kül parçacıkları ve motor aşınma parçacıklarından oluşur. SOF, yakıt ve yağlama yağından kaynaklanır. SOF temel olarak hidrokarbon bileşenlerinin yanı sıra bir miktar hidrojen, SO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub> ve eser miktarda kükürt, kalsiyum, demir, çinko, fosfor, silikon ve krom içerir. Dizel yakıt kükürt, çinko, silikon, kalsiyum, demir, krom ve fosforu içerirken, yağlama yağı da kalsiyum, fosfor ve çinko içerir. PM emisyonları akciğer kanseri, astım, bronşit, kalp ve damar hastalıkları gibi sağlık tehlikelerine yol açmakta, ayrıca su, toprak ve havanın kirlenmesine neden olmaktadır.



### Karbon Monoksit (CO)

Zehirli, renksiz ve kokusuz bir gaz olan karbon monoksit emisyonu, eksik bir yanma ürünüdür. Oluşumunun nedenleri oksijen eksikliği, düşük sıcaklık ve yanma işlemi sırasında reaksiyon için yeterli zamanın olmamasıdır. Bu nedenle karbonun tamamı karbondioksite dönüştürülemez. Dizel motorlar yüksek hava fazlalık katsayı değerlerinde çalıştığı için benzinli motorlara göre çok daha düşük CO emisyonu salmaktadır. CO sadece istenmeyen emisyon değil aynı zamanda motor tarafından tamamen faydalı işe dönüştürülemeyen kimyasal enerjidir. Aşağıdaki denklemde gösterildiği gibi CO, ek termal enerji üretmek için yakılabilen bir yakıttır.



CO, hidrokarbon yakıtın yanması sırasında oluşan bir ara üründür ve HC radikali olarak adlandırılan “R” ile aşağıdaki denklemde verilebilir.



Yukarıdaki reaksiyonda verildiği gibi HC radikali CO'ya dönüşür.



Daha sonra CO, yukarıdaki reaksiyonlarda olduğu gibi hafifçe CO<sub>2</sub>'ye oksitlenir.



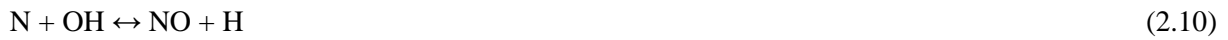
Reaksiyonların devamında OH radikallerinin olduğu görülmektedir. CO bulunduğu akciğerler tarafından hızla emilir ve kandaki hemoglobin ile birleşerek karboksihemoglobini oluşturur. Hemoglobin ile bağlanma afinitesi açısından CO, oksijenden 200 ila 240 kat daha yatkındır. CO-hemoglobinin bağlanması oksihemoglobinkinden çok daha karardır. CO'ya maruz kalma nedeniyle kanın vücut dokularına oksijen taşıma kapasitesi azalır. CO zehirlenmesi nedeniyle oksijen arzının



azalması, doku ve hücrelerin yaralanmasına yol açar. Oksijen ihtiyacı daha fazla olduğu için beyin ve sinir sistemi üzerindeki olumsuz etkiler daha yüksek ve daha hızlı ilerler.

### Azot Oksitleri (NO<sub>x</sub>)

Azot Oksitleri (NO<sub>x</sub>) emisyonları dizel motorların en sorunlu ve kirlenici emisyon türlerinden biridir. NO<sub>x</sub>, yanma işlemi sırasında nitrojen ve oksijen kombinasyonlarından oluşan zehirli bir gaz karışımı olan nitrojen oksitler için genel bir kavram olarak kullanılır. Genel olarak NO<sub>x</sub>, nitrik oksit (NO), nitrojen dioksit (NO<sub>2</sub>), nitroz oksit (N<sub>2</sub>O), dinitrojen pentoksit (N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) vb.'yi içerir ve temel olarak NO ve NO<sub>2</sub>'yi temsil eder. Dizel motor egzoz gazındaki NO<sub>x</sub> emisyonlarının %95'i NO ve %5'i NO<sub>2</sub>'den oluşmaktadır. Yanma proseslerinde NO<sub>x</sub>, kısmen yakıtın içindeki NH<sub>3</sub>, NC, HCN gibi nitrojen bileşiklerinden oluşur ancak esas olarak atmosferdeki oksijen ile alevdeki nitrojenin doğrudan birleşiminden oluşur ve istenmeyen emisyonlar olarak egzozdan dışarı atılır. NO<sub>x</sub> emisyonlarının oluşumu üç şekilde meydana gelir: yakıt, ani ve termal. Yakıtta bulunan nitrojen bileşikleri atmosferik oksijenle reaksiyona girdiğinde yakıt NO<sub>x</sub> oluşumu oluşur. Yanma mekanizmasının ilk aşamalarında üretilen hidrokarbon serbest radikallerinin moleküler nitrojenle reaksiyonu sonucu oluşan NO<sub>x</sub> formlarına hızlı NO<sub>x</sub> oluşumu adı verilmektedir. Havada bulunan nitrojen ve oksijen yüksek sıcaklıklarda reaksiyona girdiğinde termal NO<sub>x</sub> oluşumu meydana gelebilir. Termal NO<sub>x</sub> oluşumu, Zeldovich mekanizmasının önerdiği radikal zincir reaksiyonuyla tamamen açıklanmaktadır.



Yukarıda bahsedilen bir dizi reaksiyon mekanizmasında, yanma işlemi sırasında ve sonrasında yüksek sıcaklıklarda NO oluşumu meydana gelir.

Oluşan NO daha sonra NO<sub>2</sub> oluşturmak üzere farklı şekillerde reaksiyona girebilir.





## OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ LABORATUVARI



Fotokimyasal dumanın önde gelen nedenlerinden biri NO<sub>x</sub> emisyonlarıdır. Bu duman tabakası, atmosferik havanın, motorların egzozundan çıkan gazlarla güneş ışığı altında reaksiyona girmesi sonucu oluşur. NO<sub>x</sub>, çevre üzerinde başka bir olumsuz etkiye sahip olan asit yağmurlarının nedenidir.



Yukarıdaki reaksiyonun sonucunda NO ve tek atomlu oksijen açığa çıkar. Tek atomlu oksijen, moleküler oksijen (O<sub>2</sub>) ile birleşerek ozon (O<sub>3</sub>) oluşturur.



Ozon, klor gibi keskin bir kokuya sahip, renksiz bir gazdır. Stratosferde ultraviyole ışınlarla karşı kalkan görevi gören, hayat kurtaran bir ozon tabakası oluşturur. Ancak yer seviyesindeki ozon yüksek oksitleyici özelliğinden dolayı zararlıdır. Solunum yollarının ve akciğerlerin mukoza zarlarının tahriş olmasına neden olur. Düşük seviyelerde ozona (0,3 ila 0,9 ppm) maruz kalma, kuru boğaz öksürüğü ve göğüs rahatsızlığı gibi semptomlara neden olur. Ozona maruz kalmak da göz tahrişine neden olabilir. Üç saat boyunca 0,2 ppm ozona maruz kalmak görme keskinliği gibi görme bozukluklarına, gece görüşünün azalmasına ve gözün pozisyonunu kontrol eden kasların dengesinin bozulmasına neden olur. CO'nun hemoglobine bağlanması gibi NO da oksijenin hemoglobine bağlanmasını engelleyerek kendi kendine bağlanır. Bu bağlanma, kanın dokulara oksijen taşıma kapasitesini azaltan bir durum olan methemoglobin oluşumuna neden olur. Ayrıca kırmızı kan hücrelerinin zarar görmesine de neden olur. Etkilenen kişide methemoglobin konsantrasyonu toplam hemoglobin miktarının %10'unu aştığında, siyanoz olarak bilinen oksijen yetersizliği nedeniyle ciltte mavimsi bir renk değişikliğine neden olur. Konsantrasyon artışı durumunda halsizlik, nefes darlığı, baş ağrısı gibi belirtiler ortaya çıkabilir. Azot oksitlere maruz kalmanın ana semptomları arasında özellikle dudaklarda, el ve ayak parmaklarında siyanoz meydana gelir. Düşük NO<sub>2</sub> konsantrasyonları üst solunum yollarında hafif tahrişe neden olabilir. Bu tür maruziyet astımlı kişilerde astım ataklarını tetikleyebilir. Nitrojen oksitler burun ve boğaz astarındaki sulu mukoza ortamında çözünürse nitro ve nitrik asitlerin oluşmasına neden olur. Bu asitler, akut maruz kalma durumunda solunum yolu mukozasında ani tahrişe neden olur. Yeterli gaz akciğerlere ulaştığında akut bronşit, akciğer ödemi ve hatta ölüme neden olabilir.



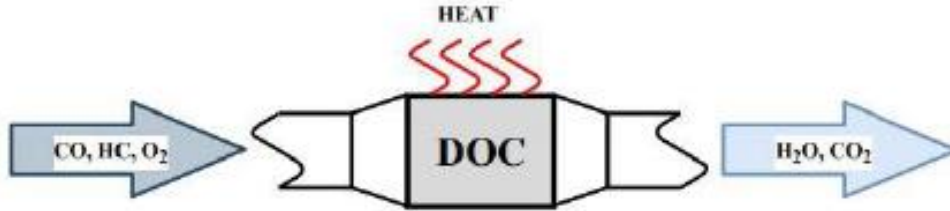
## DİZEL MOTOR EMİSYON KONTROL SİSTEMLERİ

### Dizel Motorlar İçin Emisyon Kontrol Teknikleri

Sıkı ve zorunlu emisyon düzenlemelerine uyum sağlamak amacıyla, dizel motor emisyonlarının azaltılması konusunda bilimsel ve ticari amaçlarla birçok araştırma ve geliştirme faaliyeti yürütülmektedir. Emisyonları azaltmak için geliştirilen en önemli sistemler, partikül madde emisyonlarını gidermek için kullanılan Dizel Partikül Filtreleme (DPF), CO ve HC emisyonlarını azaltmak için kullanılan Dizel Oksidasyon Katalizörü (DOC), NO<sub>x</sub> emisyonlarını en aza indirmek için Yalın NO<sub>x</sub> Tuzağı (LNT) ve Seçici Katalitik İndirgeme (SCR) kullanılır.

### Dizel Oksidasyon Katalizörü (DOC)

Exozdan çevreye salınan CO ve HC gibi zararlı gazları bir katalizör yardımıyla reaksiyona sokarak zararsız gazlar yapan sistemdir. Gazların akış yönü genellikle uzunlamasına. Katalitik özelliğe metalik veya seramik petek yapı üzerine paladyum veya platin kaplama eklenir. Böylece CO ve HC gazları su ve karbondioksit'e dönüşür. Ancak NO<sub>x</sub>'i azaltmaz ve NO<sub>x</sub> üzerindeki etkisi NO ve NO<sub>2</sub>'nin orantılı olarak eşit olmasını sağlar. Bu, SCR sisteminin daha verimli çalışması anlamına gelir. PM emisyonlarını düşük bir orana indirme etkisine sahiptir. Şekilde DOC sistemini göstermektedir.

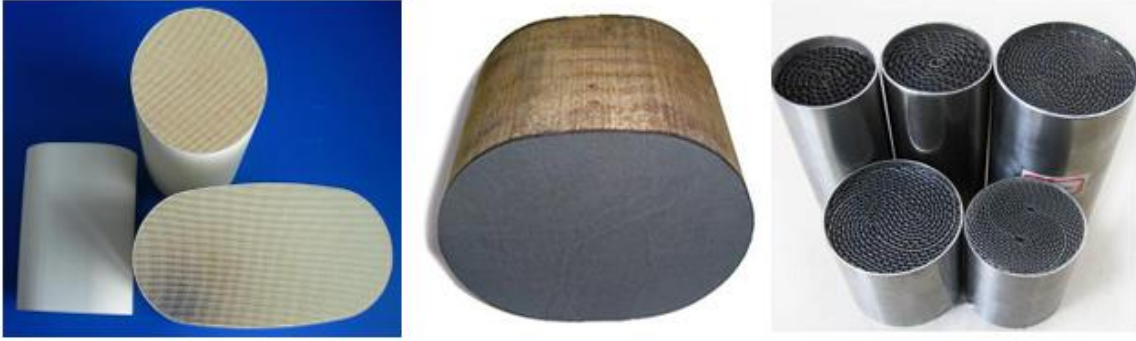


DOC Sisteminin Şeması

DOC sistemindeki reaksiyonlar;



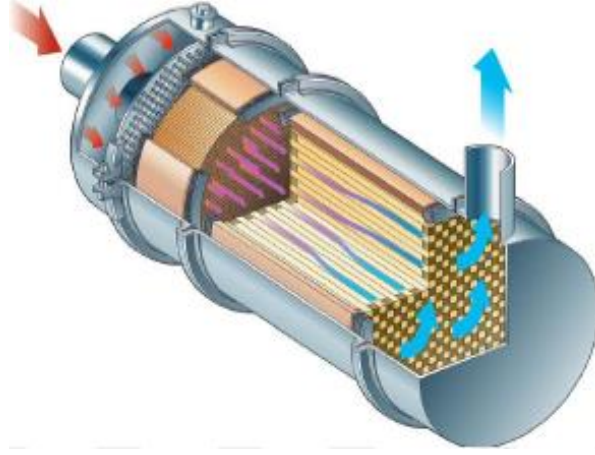
$\text{CO}_2$  ve  $\text{H}_2\text{O}$ , 4.1 ile 4.3 arasındaki denklemlerde CO ve HC emisyonlarının oksidasyonu sonucu elde edilir. Hidrokarbonlar alkanlar, alkenler ve aromatikler gibi binlerce farklı türden oluşmasına rağmen genellikle  $\text{C}_3\text{H}_6$  (propilen) formundadır. Denklem 4.4'te gösterildiği gibi, NO emisyonu  $\text{NO}_2$  formuna dönüştürülür.  $\text{NO}_x$  içindeki  $\text{NO}_2$  konsantrasyonu, DOC sisteminden sonra SCR sistemi için büyük önem taşımaktadır.  $\text{NO}_x$  içeriğindeki  $\text{NO}_2$  konsantrasyonunun yüksek olması SCR sisteminin verimini artırır.



Farklı yapı ve şekildeki dizel oksidasyon katalizörleri

### Dizel Partikül Filtresi (DPF)

DPF sistemi dizel motorlu araçlarda 2000 yılından beri kullanılmaktadır. Dizel motorlarda PM emisyonları tam yanmadan kaynaklanan bir emisyon türüdür. Dizel partikül filtresi, egzoz gazlarının emisyon kontrol sisteminden geçmesine izin verirken katı ve sıvı partikül madde egzoz emisyonlarını önleyecek şekilde tasarlanmıştır ve motor sonrası egzoz sistemine takılır. Ticari olarak kullanılan dizel partikül filtresi üretiminde silisyum karbür ( $\text{SiC}$ ), kordiyerit ( $2\text{MgO}-2\text{Al}_2\text{O}_3-5\text{SiO}_2$ ) veya metal yapı kullanılmaktadır. Bu yapılar genellikle kare geometri görünümünde çok sayıda gözenekli ve paralel kanallardan oluşur. Kanal duvar kalınlığı yaklaşık 300 ila 400  $\mu\text{m}$ 'dir. Gözenek sayısı 100-300 cpsi (inç kare başına gözenek sayısı) arasında değişir. Dizel partikül filtresine genel bakış, Şekil'de görülmektedir.

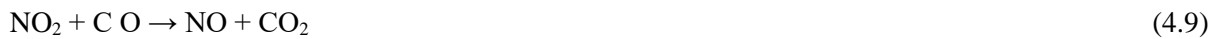


Dizel Partikül Filtresi (DPF)

### NOx Depolama Katalizörü (LNT)

Yalın nitrojen oksit tuzağı (LNT) teknolojisi, Azot oksit emici katalizör (NAC), Azot oksit depolama katalizörü (NSC) veya Azot oksit depolama/indirgeme (NSR) katalizörü gibi çeşitli isimlerle adlandırılır. Bu yöntem, özellikle düşük egzoz durumunda NOx emisyonlarını azaltmanın başka bir yoludur. Egzoz gazının içeriğindeki NOx emisyonları, düşük egzoz gazı sıcaklıklarında katalizör yüzeyinde emilir ve egzoz gazı yüksek sıcaklık değerlerine ulaştığında salınır. LNT katalizörü bir oksidasyon katalizörü, alkali metallerle birleştirilmiş bir emici ve bir indirgeme katalizöründen oluşur. LNT katalizörleri genellikle alüminyum oksit ( $Al_2O_3$ ) yapısıyla desteklenen baryum karbonat ( $BaCO_3$ ), Platin (Pt) ve Rodyum (Rh) gibi NOx depolamalı bir bileşen içerir. LNT katalizöründeki reaksiyonlar 2 farklı çevrimde zayıf ve zengindir. Zayıf döngüde NO, depolama bileşeni tarafından emilir ve katalizör yüzeyinde  $NO_2$ 'ye oksitlenir ve yüzeyde nitrat formunda depolanır. Zengin döngüde depolanan NOx yüzeyden salınır. NOx, eksik yanmadan oluşan CO, HC ve  $H_2$  yardımıyla katalizör yüzeyinde  $N_2$ 'ye dönüştürülür.

LNT katalizöründeki reaksiyonların tamamı Denklem (4.5)-(4.10)'da verilmiştir.

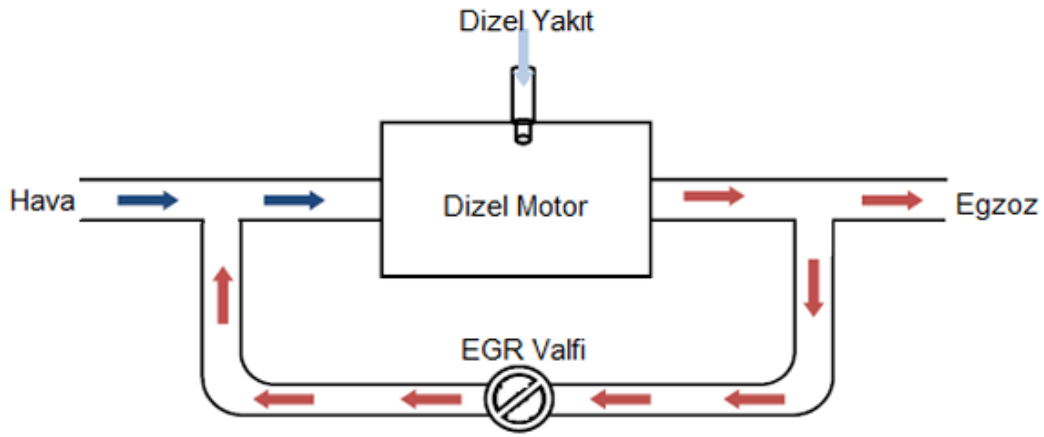




Denklem (4.5) için egzoz gazı sıcaklığının düşük olması durumunda NO emisyonları platin katalizör üzerinde oksitlenerek NO<sub>2</sub> formuna dönüşmektedir. Daha sonra Denklem (4.6)'da NO<sub>2</sub> emisyonları, NO<sub>x</sub> emisyonlarını depolayabilen baryum nitrat formunda emilir. Depo tam kapasiteye ulaştığında egzoz gazı yüksek sıcaklıklara çıkarılarak rejenerasyon işlemine geçilir. Denklem (4.7) ve Denklem (4.8)'de, rejenerasyon işlemi sırasında depolanan nitrojen bileşikleri termodinamik olarak kararsız hale gelir ve NO ve NO<sub>2</sub> formlarına ayrışır. Daha sonra CO, HC ve H<sub>2</sub>'nin varlığında N<sub>2</sub>'yi oluşturmak için NO ve NO<sub>2</sub> bileşenleri indirgeme katalizöründe indirgenir. LNT sistemlerinde rejenerasyon işlemi için silindir içerisine hidrojen veya ekstra dizel yakıt püskürtülerek egzoz gazı sıcaklığının artırılması gerçekleştirilebilmektedir. Dizel motorların zayıf karışımı nedeniyle HC, egzoz gazına dışarıdan enjekte edilir. LNT teknolojisinde enjekte edilen yakıt miktarı, püskürtme aralığı ve katalizörün NO<sub>x</sub> depolama kapasitesi, yakıt ekonomisi açısından optimize edilmesi gereken parametrelerdir. LNT teknolojisi düşük egzoz gazı sıcaklıklarında NO<sub>x</sub> dönüşümü için uygun bir yöntem olmasına rağmen bazı dezavantajlara sahiptir. LNT katalizörleri, NO<sub>x</sub> emisyonlarının oksidasyon sürecini artırmak ve sürdürmek için çok değerli metallere biri olan Pt'yi içerir. LNT katalizörleri, NO<sub>x</sub> emisyonlarının oksidasyon sürecini artırmak ve sürdürmek için Pt gibi oldukça değerli metaller içerir. Ancak bu durum maliyeti artırmaktadır. Aynı zamanda LNT katalizörlerinin depolamayı sağlamak için NO oksidasyonu ile NO<sub>2</sub> formunu sağlaması gerekmektedir. Bu nedenle 150°C'nin altındaki egzoz gazı sıcaklıklarında yüksek NO<sub>x</sub> depolama verimliliğine sahip değildirlir. Öte yandan depolama sonucu oluşan nitratlar (NO<sub>3</sub>) oldukça stabildir ve NO<sub>x</sub> emisyonlarının katalizör yüzeyinde HC, CO, H<sub>2</sub> gibi indirgeyicilerle ayrıştırılarak nitratların oluşması için ayrıştırılması gerekmektedir. Zengin çalışma koşulları altında N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O. Bu durum yakıt ekonomisini olumsuz etkilediği gibi CO, HC ve PM emisyonlarında da istenmeyen artışlar meydana gelebilmektedir. LNT katalizörlerinin NO<sub>x</sub> emilimi kükürt bileşikleri tarafından da zehirlenebilmekte ve bu istenmeyen kükürt zehirlenmesi katalizörün özelliğini kaybetmesine neden olmaktadır. Kükürt toksisitesinin giderilmesi, 600-750°C egzoz gazı sıcaklıklarında kükürt giderme yöntemiyle gerçekleştirilebilir. Bu, yakıt tüketiminde ve diğer kirletici emisyonlarda artışa yol açar. Düşük kükürtlü dizel yakıt (ULSD) kullanımı, kükürt zehirlenmesi ve kükürt giderme adımını azaltır. LNT katalizörlerinin bu dezavantajlarını ortadan kaldırmak için seryum (Ce), paladyum (Pd) gibi farklı katalizör türleri ve farklı yöntemler araştırma konusu haline gelmiştir.

### Egzoz Gaz Resirkülasyonu (EGR)

EGR içten yanmalı motorlarda NO<sub>x</sub> emisyonlarını azaltma tekniğidir ve dizel motorlu araçlarda uzun zamandır kullanılmaktadır. EGR sistemi egzoz gazlarının bir kısmının soğutulduktan sonra tekrar yanma odasına gönderilmesiyle uygulanmaktadır. EGR, karışım içerisindeki oksijen konsantrasyonunu azaltarak karışımın fakirleşmesini ve silindir gazlarının ısı kapasitesini yükselterek maksimum gaz sıcaklığının düşürülmesini sağlamaktadır. Böylece NO<sub>x</sub> emisyonlarında %50'nin üzerinde azalma elde edilebilmektedir. Ancak zorunluluk arz eden standartların sağlanabilmesi sadece EGR kullanımı ile mümkün olmamaktadır.



EGR'nin şematik olarak gösterimi

EGR'de NO<sub>x</sub> azalması çoğunlukla seyreltme etkisiyle (oksijen kütle konsantrasyonunda azalma) gerçekleşmektedir. Kimyasal ve termal etkinin (CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O ayrışması gibi endotermik reaksiyonlar sırasında tüketilen ısı) NO<sub>x</sub> azalmasına katkısı daha azdır. EGR'nin seyreltme, kimyasal ve termal etkisi Tablo'da görülmektedir.

Tablo.NOx ve PM emisyonlarına EGR'nin etkisi

EGR Etkisi	Tekrardan yanma odasına gönderilen gazların türleri	Yanma odasına gönderilen gazların durumu ve etkileri	NO <sub>x</sub> 'e etkisi	PM'e etkisi
Seyreltme	O <sub>2</sub>	Oksijen konsantrasyonunda azalma	%80-90 azalma	%80-90 artma
Kimyasal	CO <sub>2</sub>	Termal ayrışma ve onun ürünlerinin yanmaya katılması	%5-10 azalma <sup>*1</sup>	%5-10 azalma <sup>*1</sup>
	H <sub>2</sub> O			%5-10 artma <sup>*1</sup>
Termal	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub> ve N <sub>2</sub> 'den daha yüksek özgül ısı kapasitesi	%5'den daha az azalma <sup>*1</sup>	Çok düşük
	H <sub>2</sub> O			
Giriş Sıcaklığı <sup>*2</sup> (Sıcak EGR)	--	Yüksek giriş sıcaklığı ve düşük volümetrik verim	Artma <sup>*3</sup>	Artma <sup>*3</sup>

1\*-Motor çalışma moduna bağlı olarak, 2\*-Sabit kütleli dolgu debisi ve kompozisyonunda, 3\*- Dolgu giriş sıcaklığı ile orantılı

**Seyreltme Etkisi:** Egzoz gazlarının bir kısmının tekrar yanma odasına gönderilmesiyle egzoz gazının seyreltilmesidir. Bu işlem sonucunda oksijen konsantrasyonu azalmaktadır.

**Termal Etki:** Egzoz gazı çoğunlukla havadan daha yüksek özgül ısı kapasitelerine sahip olan H<sub>2</sub>O ve CO<sub>2</sub>'den oluştuğu için, silindir gazlarının özgül ısı kapasitesi daha yüksektir. Ayrıca sıcak EGR kullanılması durumunda giriş dolgu sıcaklığında bir artış olur, bu durum motorun hacimsel verimliliğini azaltır.

**Kimyasal Etki:** Yanma işlemi sırasında kimyasal reaksiyonlara aktif olarak katılan veya ayrışan seyreltici EGR gazlarını içerir. CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O ayrışması gibi endotermik reaksiyonlar yoluyla ısının tüketilmesinin etkisiyle silindir içi maksimum sıcaklığında düşüş meydana gelir. EGR kullanımı ile hava fazlalık katsayısının azalması nedeniyle is ve partikül madde emisyonlarında artış meydana gelmektedir. Silindir içindeki oksijen miktarının azalması HC ve CO emisyonlarının artmasına neden olmaktadır. EGR sistemi yakıt ekonomisi ve motor gücü açısından da olumsuz etkilere sahiptir. EGR'de



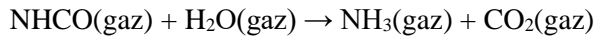
bulunan yoğunlaşmış su ve sülfirik asit korozyona yol açmaktadır. EGR'nin ağır hizmet araçlarında kullanımı motorların ömürlerini olumsuz olarak etkilemektedir.

### Seçici Katalitik İndirgeme (SCR)

Seçici katalitik indirgeme sistemi dizel motorlu taşıtlarda NO<sub>x</sub> standartlarının sağlanabilmesi amacıyla kullanılan ve indirgeyicinin egzoz gazına ilave edilmesi sonucu katalizör yardımıyla azotoksitlerin (NO<sub>x</sub>), azot (N<sub>2</sub>) ve suya (H<sub>2</sub>O) dönüşmesini sağlayan sistemdir. Dizel motorlu araçlarda SCR kullanımı ile %90'nın üzerinde NO<sub>x</sub> indirgenmesi sağlanabilmektedir. SCR sisteminde indirgeyici olarak çoğunlukla amonyak veya sulu üre çözeltisi kullanılmaktadır. Amonyak kullanımı insan ve hayvan sağlığı açısından tehlikelidir. Yüksek konsantrasyonda temas edilmesi durumunda cilt, göz ve solunum sisteminde tahrişe yol açar. Amonyak oda sıcaklığında gaz halindedir ve kolayca alevlenebilir. Ayrıca motor parçalarını aşındırıcı etkiye sahiptir. Amonyagin yüksek buhar basıncına sahip olması nedeniyle depolanması ve araca monte edilerek güvenli bir şekilde taşınabilmesi zordur. Bu nedenle çoğunlukla SCR sisteminde indirgeyici olarak amonyak yerine sulu üre çözeltisi (adBlue) kullanılmaktadır. Sulu üre çözeltisi %32,5 üre ve %67,5 su karışımından oluşmaktadır. Sulu üre çözeltisinin egzoz gazına enjekte edilmesi sonucu ısı çözünme gerçekleşir ve üredeki su buharlaşır. Katı üre 133 °C'de erimeye başlar ve ısı etkisiyle ayrışma gerçekleşir. Böylece, amonyak ve izosiyanik asit oluşur.

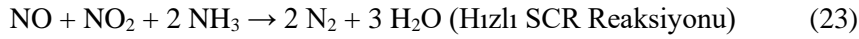
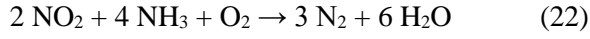
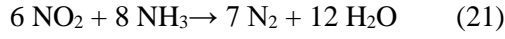
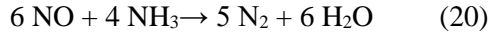


SCR katalizörü varlığında yaklaşık 400°C'deki sıcaklıklarda izosiyanik asidin hidrolizi kolaylaşmaktadır. Gaz formunda kararlı olan izosiyanik asit reaksiyonda görüldüğü gibi hidroliz olarak amonyak ve karbondioksite dönüşür.

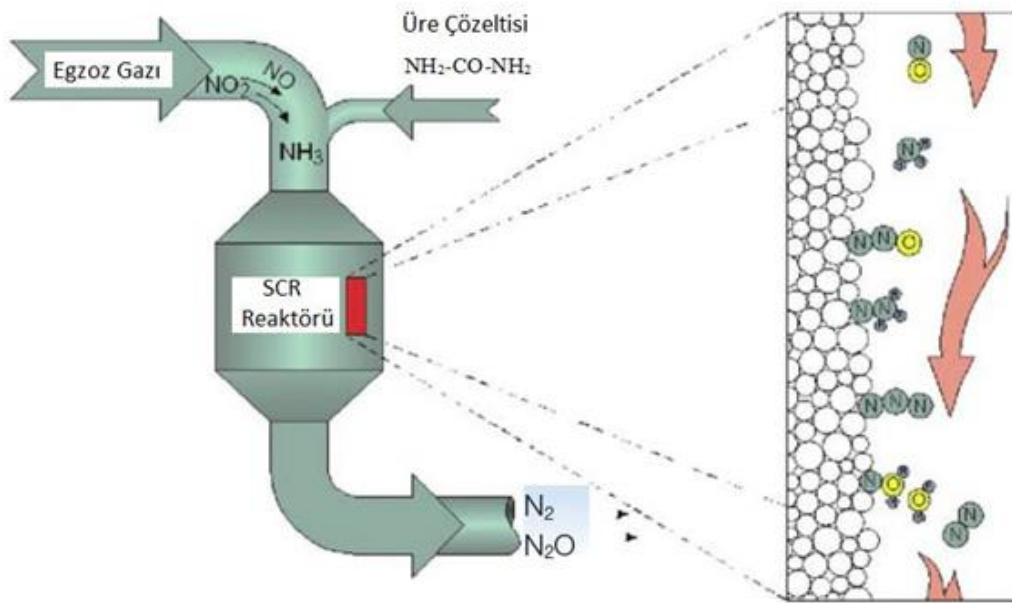


Reaksiyonlarda görüldüğü gibi 1 mol üreden 2 mol amonyak oluşmaktadır. Ürenin moleküler ağırlığı 60 g/mol, amonyağın ise 17 g/mol'dür. Sonuç olarak 1,76 gram üreden 1 gram amonyak oluşmaktadır. SCR sisteminde amonyak NO, NO<sub>2</sub> ve oksijen ile reaksiyona girmektedir. Bu reaksiyonlar ortamda oksijen bulunması durumunda meydana gelmektedir. Oksijen redoks tepkimesi sırasında elektron vermekte ve böylece NO-NH<sub>3</sub> reaksiyonunun oranını arttırmaktadır.





19. reaksiyon NO, O<sub>2</sub> ve NH<sub>3</sub> arasında meydana gelmektedir. Bir emisyon kontrol sisteminde DPF yada NO'ü NO<sub>2</sub>'e dönüştüren başka bir katalizör yok ise büyük çoğunlukla bu reaksiyon gerçekleşir. Çünkü motor çıkışında egzoz gazı içerisinde yaklaşık %90 NO ve %10 NO<sub>2</sub> vardır. 20. ve 21. reaksiyonlarda oksijen kullanımı yoktur ve diğer reaksiyonlara göre çok daha yavaştır. Dizel motorlarda fakir karışım yanma söz konusu olduğu için bu reaksiyonun gerçekleşme oranı oldukça düşüktür. 22. reaksiyonun hızı da düşüktür ve NO<sub>2</sub> oranı %50'yi geçmesi durumunda katalizör verimi azalır. 23. reaksiyonun gerçekleşebilmesi için ortamda NO ile NO<sub>2</sub> bulunması gerekmektedir. 23. reaksiyon diğer reaksiyonlardan çok daha hızlıdır ve daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşir. Söz konusu beş reaksiyon değerlendirildiğinde, egzoz gazı içerisinde NO/NO<sub>2</sub> oranı 1 olması durumunda SCR sisteminde daha yüksek dönüşüm verimi elde edilebilmektedir.

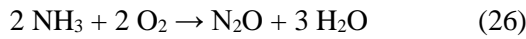
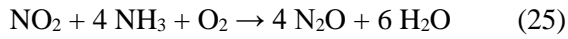
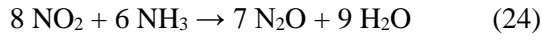


SCR sistemi

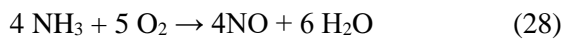
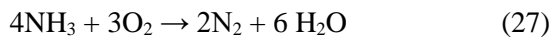




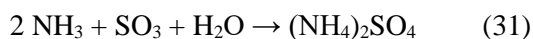
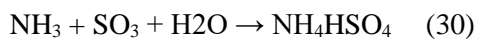
SCR sisteminde indirgeyici olarak NH<sub>3</sub> kullanılması ile %70-98 oranında NO<sub>x</sub> dönüşümü elde edilebilmektedir. Yüksek verimin elde edilebilmesi için egzoz gazına ilave edilen üre çözeltilisinin oranının kontrol edilmesi ve değişen çalışma koşullarına uygun olarak ayarlanması gerekmektedir. Üre çözeltisi miktarının yetersiz olması durumunda indirgenen NO<sub>x</sub> miktarı azalmaktadır. Fazla miktarda kullanılması durumunda ise dışarıya sistemden amonyak salınımı olmaktadır. Egzoz gazında NO<sub>2</sub> miktarının %50'nin üzerine çıkması durumunda SCR sisteminde amonyak ile NO<sub>2</sub> reaksiyona girmekte ve bunun sonucunda sera gazının yaklaşık %2'sini oluşturan N<sub>2</sub>O oluşabilmektedir (24 ve 25 nolu reaksiyon). 450 °C'deki sıcaklıklarda amonyakla oksijenin reaksiyona girmesi de N<sub>2</sub>O oluşumuna neden olmaktadır (26 nolu reaksiyon).



Dizel egzoz gazında oksijenin fazla miktarda bulunması durumunda istenmeyen reaksiyonlar meydana gelmekte ve sonuç olarak su, nitrojen ve NO oluşabilmektedir. Bu durum 27 ve 28 nolu reaksiyonda verilmiştir.



200 °C'nin altındaki sıcaklıklarda ise amonyum nitrat ve amonyum sülfatlar oluşmaktadır (29, 30 ve 31 nolu reaksiyon). Amonyum nitrat ve amonyum sülfatların katalizörün üzerinde birikmesi katalizörün deaktivasyonuna neden olmaktadır.



Sulu üre çözeltisi -11 °C sıcaklıkta donduğu için soğuk hava koşullarının olduğu kış aylarında kullanımı uygun değildir. Soğuk hava koşullarında amonyak kaynağı olarak amonyum format (HCO<sub>2</sub>NH<sub>4</sub>)



## OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ LABORATUVARI

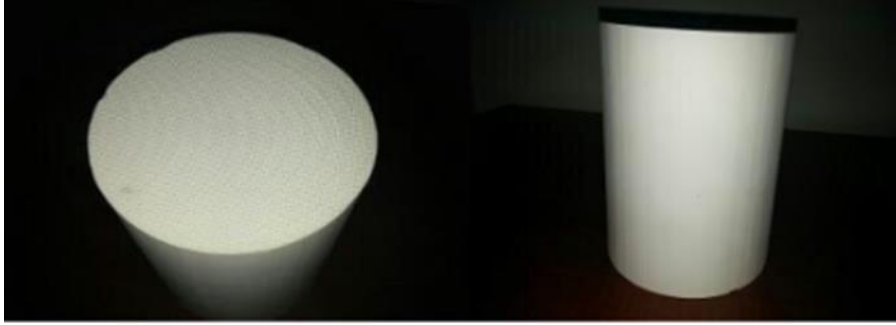


kullanılmaktadır. Amonyum formatın %40'lık sulu çözeltisi  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de donmaktadır. Fakat bu çözeltinin  $\text{NH}_3$  içeriği ürenin içeriğinden daha azdır.

## DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### SCR Katalizörlerinin Elde Edilmesi

SCR katalizörlerinin üretiminde ana yapı olarak kordiyerit ( $2Al_2O_3-5SiO_2-2MgO$ ) kullanılmıştır ve bu materyaller hazır olarak temin edilmiştir. Kordiyerit materyaller düşük termal genleşme katsayısına sahip olması ve maliyetinin diğer materyallere kıyasla daha düşük olması nedeniyle tercih edilmiştir. Kordiyerit malzemeler inç karede 400 adet kare şeklinde gözeneğe sahip olan yapılardır.



Kordiyerit yapı

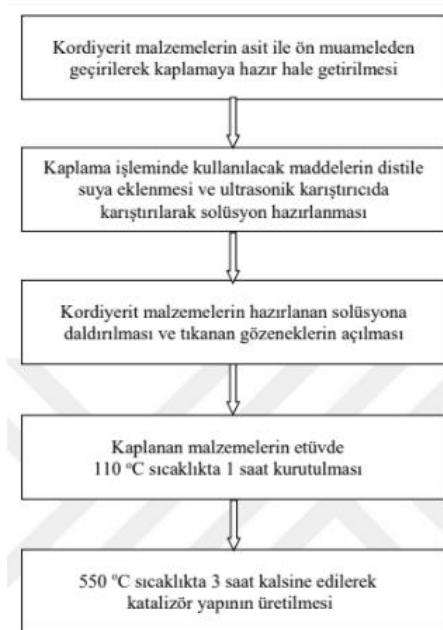
SCR katalizörlerinin üretimi amacıyla  $\varnothing 103 \times 130$  mm boyutlara sahip olan kordiyerit malzemeler hacimleri  $200 \text{ cm}^3$  olacak şekilde parçalara ayrılmıştır. Kordiyeritin yaklaşık  $0,5 \text{ m}^2/\text{g}$  olan yüzey alanının artırılması amacıyla malzemeler oksalik asit ile ön muameleden geçirilmiş ve kaplamaya hazır hale getirilmiştir. Katalizör üretimi emdirme yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiş ve bunun için iki farklı solüsyon hazırlama metodu kullanılmıştır. Gümüş esaslı katalizör üretiminde ilk olarak katalitik etki göstermesi beklenen maddeleri içeren solüsyon hazırlanmıştır. Bu amaçla 500 ml distile suyun içine 30 g gümüş nitrat ( $AgNO_3$ ), 2 g niyobyum(V)klorid ( $NbCl_5$ ) ve 1 g tetraaminplatin(II)nitrat ( $Pt(NH_3)_4(NO_3)_2$ ) eklenmiş ve ultrasonik karıştırıcı kullanılarak maddelerin çözünmesi sağlanmıştır. Elde edilen solüsyona ön muameleden geçirilerek kaplamaya hazır hale getirilen kordiyerit parçalardan biri daldırılmış ve işlem sonunda tıkanan gözenekler hava tabancası kullanılarak açılmıştır. Kaplanan kordiyerit parça  $110 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıktaki etüvde 1 saat kurutulduktan sonra  $550 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta 3 saat kalsine edilerek gümüş, niyobyum ve platin içeren katalizör elde edilmiş ve ANP katalizörü olarak adlandırılmıştır.



### Katalizörlerin üretim aşamaları

SEM, BET ve XRD analizinin yapılabilmesi için hazırlanan solüsyona küçültülen kordiyerit parçaları daldırılmış ve ANP katalizörü üretim aşamasındaki işlem basamakları aynen uygulanmıştır. Gümüş esaslı katalizör üretiminde kullanılan kimyasal maddeler şunlardır: Gümüş nitrat ( $\text{AgNO}_3$ ): Mercek olup 169,87 g/mol molekül ağırlığına, 4,35 g/cm<sup>3</sup> yoğunluğa sahiptir. Niyobyum(V)klorid ( $\text{NbCl}_5$ ): Sigma-Aldrich olup %99 saflıkta, 270,17 g/mol molekül ağırlığında, 2,75 g/cm<sup>3</sup> yoğunluktadır. Tetraaminplatinum(II)nitrat ( $\text{Pt}(\text{NH}_3)_4(\text{NO}_3)_2$ ): Sigma-Aldrich olup 387,21 g/mol molekül ağırlığındadır ve  $\geq\%50$  Pt içermektedir.

### ANP katalizörünün üretiminde uygulanan işlem basamakları

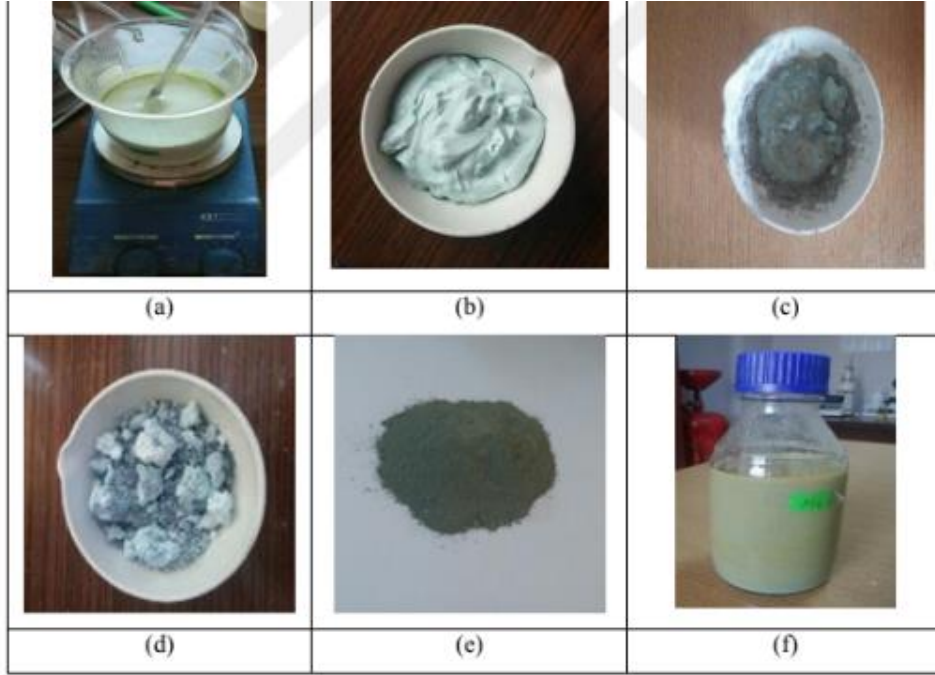


Titanyum esaslı katalizörlerin üretimi için molar miktarları toplamı 1 olacak şekilde 0,05 M Vanadyum (V), 0,05 M Bakır (Cu), 0,9 M Titanyum (Ti) ve V molar miktarının iki katı kadar oksalik asit kullanılmıştır. Yapılan hesaplamalar doğrultusunda 5,89 g amonyum mono vanadat ( $\text{NH}_4\text{VO}_3$ ), 2,74 g bakır nitrat trihidrat ( $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) ve 17,53 g oksalik asit ( $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) 500 ml distile suya eklenmiş ve ultrasonik karıştırıcı yardımıyla maddelerin çözünmesi sağlanmıştır. Hazırlanan karışıma 100 g  $\text{TiO}_2$  eklenerek manyetik karıştırıcıda 90 oC sıcaklıkta sürekli karıştırılmış ve bu işleme koyu bir kıvam elde edilinceye kadar devam edilmiştir. Koyu bir kıvama gelen karışım, içindeki suyun tamamen uzaklaştırılması amacıyla 110 oC sıcaklıktaki etüvde 1 saat kurutulmuştur. Daha sonraki aşamada ise 550 oC sıcaklıkta 3 saat süreyle kalsinasyon işlemi gerçekleştirilmiş ve akabinde toz katalizör elde etmek amacıyla öğütülmüştür. Bu yöntemle elde edilen toz katalizörden 40 g alınarak 500 ml distile suya eklenip karıştırılmış ve Ti, V, Cu içeren solüsyon hazırlanmıştır.



Ti, V, Cu içeren solüsyon hazırlanmasına ait resimler

Aynı yöntem kullanılarak Titanyum (Ti), Vanadyum (V) ve Molibden (Mo) içeren solüsyon hazırlanmıştır. Solüsyon hazırlamada 5,89 g amonyum mono vanadat ( $\text{NH}_4\text{VO}_3$ ), 11,14 g amonyum hepta molibdat ( $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), 17,53 g oksalik asit ( $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ve 100 g titanyumdioksit ( $\text{TiO}_2$ ) kullanılmıştır. Ti, V, Cu içeren solüsyon hazırlama yönteminde uygulanan işlem basamakları takip edilerek Ti, V, Mo içeren solüsyon elde edilmiştir.



Ti, V, Mo içeren solüsyon hazırlanmasına ait resimler (a. Karışım hazırlanmış hali, b. Karışımın ısıtılarak macun kıvamına getirilmiş hali, c. Fırınlanma sonrası hali, d. Kalsinasyon sonrası hali, e. Öğütülmüş hali, f. Solüsyon hazırlanmış hali)

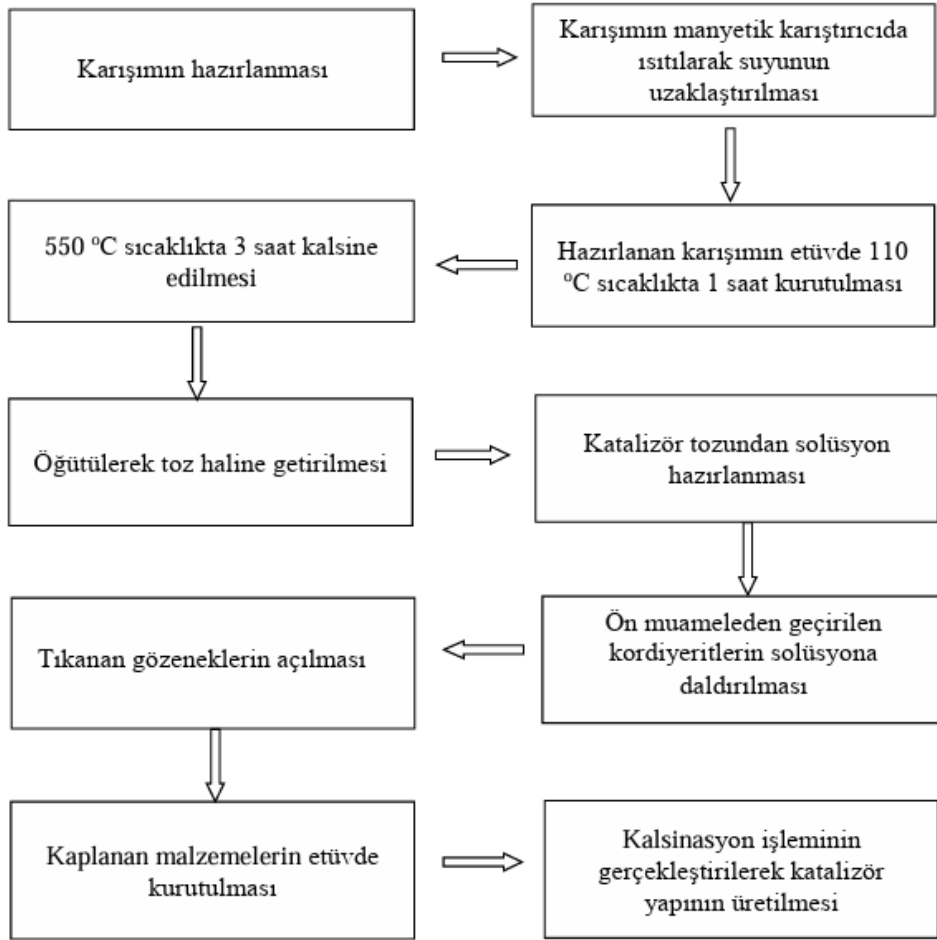
Daha sonraki aşamada ise ön muameleden geçirilerek kaplamaya hazır hale getirilen kordiyerit parçalar hazırlanan solüsyonlara daldırılmış ve daldırma esnasında kapanan gözenekler hava tabancasıyla açılmıştır. Kaplanan kordiyeritler 110 oC sıcaklıktaki etüvde 1 saat kurutulduktan sonra 550 oC sıcaklıkta 3 saat kalsine edilerek katalizör üretimi gerçekleştirilmiştir. Ti, V, Cu içeren katalizör TVC olarak Ti, V, Mo içeren katalizör ise TVM olarak adlandırılmıştır.

Aynı işlem basamakları SEM, BET ve XRD analizlerinin yapılacağı kordiyerit parçalarına da uygulanmıştır.



Kaplama işlemine ait resimler

Tablo 3.2. TVC ve TVM katalizörlerinin üretiminde uygulanan işlem basamakları

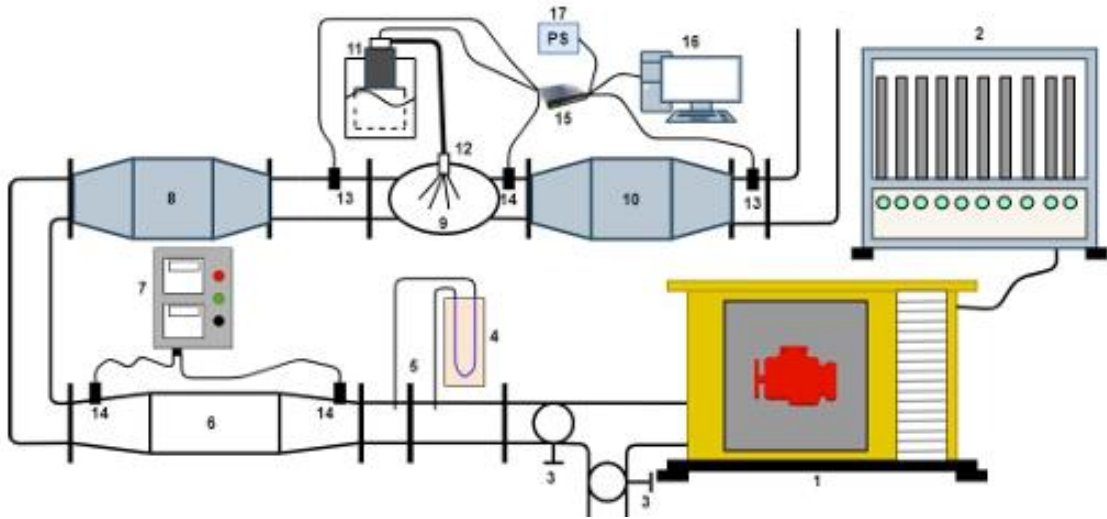




Titanyum esaslı solüsyon hazırlanmasında kullanılan kimyasal maddeler şunlardır: Amonyum mono vanadat ( $\text{NH}_4\text{VO}_3$ ): Merck olup 116,97 g/mol molekül ağırlığındadır. Amonyum hepta molibdat ( $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ): Merck olup 1235,86 g/mol molekül ağırlığına, 62,498 g/cm<sup>3</sup> (20 oC) yoğunluğa sahip olan kimyasal maddedir. Oksalik asit ( $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ): Merck olup 126,07 g/mol molekül ağırlığında,  $\geq 99$  saflıkta olan kimyasal maddedir. Titanyum dioksit ( $\text{TiO}_2$ ): Merck olup 79,866 g/mol molekül ağırlığında, 4,23 g/cm<sup>3</sup> yoğunluktadır. Bakır (II) nitrat trihidrat ( $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ): Merck olup 241,6 g/mol molekül ağırlığına sahiptir ve  $\geq 98$  saflıktadır.

### Deney Ekipmanları

Performans test düzeneği Çukurova Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Laboratuvarında kurulmuştur.



- |                                      |                                      |
|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 1- Dizel Test Motoru                 | 10- SCR (Seçici Katalitik İndirgeme) |
| 2- Elektrikli Yükleme Ünitesi        | 11- İndirgeyici Pompa                |
| 3- Vanalar                           | 12- Enjektör                         |
| 4- Manometre                         | 13- NOX Sensörleri                   |
| 5- Orifis Plakası                    | 14- Termokupllar                     |
| 6- Egzoz Gazı Isıtma Ünitesi         | 15- SCR Kontrol Ünitesi              |
| 7- Kalorifer Kontrol Ünitesi         | 16- Bilgisayar                       |
| 8- DOC (Dizel Oksidasyon Katalizörü) | 17- 24V Güç Tedarikçisi              |
| 9- İndirgeyici enjeksiyon odası      |                                      |