

**DİZEL MOTORLARINDA SOĞUKTA İLK
HAREKETE GEÇİŞİ KOLAYLAŞTIRMAK VE
EMİSYON KARAKTERİSTİKLERİNİ
İYİLEŞTİRMEK İÇİN FAZ DEĞİŞTİREN
MADDELERİN KULLANILMASI**

Galip KALTAKKIRAN

**Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Enerji Bilim Dalı
Prof. Dr. M. Akif CEVİZ
2014**

Her hakkı saklıdır

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**DİZEL MOTORLARINDA SOĞUKTA İLK HAREKETE GEÇİŞİ
KOLAYLAŞTIRMAK VE EMİSYON KARAKTERİSTİKLERİNİ
İYİLEŞTİRMEK İÇİN FAZ DEĞİŞTİREN MADDELERİN
KULLANILMASI**

Galip KALTAKKIRAN

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENERJİ BİLİM DALI

ERZURUM
2014

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

Dizel Motorlarında Soğukta İlk Harekete Geçiş Kolaylaştırmak ve Emisyon Karakteristiklerini İyileştirmek İçin Faz Değiştiren Maddelerin Kullanılması

Prof. Dr. Mehmet Akif CEVİZ danışmanlığında, Galip KALTAKKIRAN tarafından hazırlanan bu çalışma 02/06/2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği (3/3)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Kenan YAKUT

İmza :

Üye : Prof. Dr. Mehmet Akif CEVİZ

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. Hakan TEMUR

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu 19.06.2014... tarih ve 25/782 nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. İhsan EFEOĞLU
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DİZEL MOTORLARINDA SOĞUKTA İLK HAREKETE GEÇİŞİ KOLAYLAŞTIRMAK VE EMİSYON KARAKTERİSTİKLERİNİ İYİLEŞTİRMEK İÇİN FAZ DEĞİŞTİREN MADDELERİN KULLANILMASI

Galip KALTAKKIRAN

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Enerji Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. M. Akif CEVİZ

Dizel motorların performansları ve sürüş şartları son yirmi yıl boyunca sürekli gelişme kaydetmiştir. Bununla birlikte, dizel motorların dezavantajlarından birisi düşük sıcaklıklarda, ilk hareket esnasındaki zorluklar ile ilgilidir. Buna ek olarak, zararlı egzoz emisyonları da soğukta ilk hareket koşullarında önemli seviyededir. Dizel motorlardan çıkan karbon monoksit (CO) emisyonlarının büyük bölümü motorun daimi çalışma şartlarına yaklaşması sırasında üretilir. Dizel motorların soğukta ilk hareket karakteristiklerini iyileştirmek için silindir içine kızdırma bujileri ve emme hattına hava ısıtıcıları gibi pek çok önlemler öne sürülmüştür.

Bu çalışmada, doğrudan enjeksiyonlu dizel motorların soğukta ilk hareket performanslarını artırmak ve egzoz emisyon karakteristiklerini iyileştirmek için faz değiştiren malzemeler (FDM) kullanılmıştır. Yüksek füzyon ısılarına sahip olan FDM'ler, erimeden ve donmadan önceki gizli ısıyı absorbe ederler. FDM'lerin sıcaklıkları faz değişimi boyunca neredeyse sabit kalmaktadır. Bu çalışmada ısı değiştiricisinde belli bir erime sıcaklığı aralığına sahip bir FDM kullanılmıştır. Motor soğutma suyu ısı değiştiricisinde dolaştırılmış ve FDM'yi eritmek için ısı kaynağı olarak kullanılmıştır. Motora giren hava, emme manifoldundan önce ısı değiştiricisinin boruları arasından geçirilmiştir. Motor soğuma periyodu esnasında, tasarlanan ısı değiştiricisinin içindeki FDM motor emme havasının soğuma süresini artırmıştır.

Deneyler iki silindirli mekanik püskürtme sistemli bir dizel motorda gerçekleştirilmiş ve olumlu sonuçlar gözlenmiştir. FDM'ler ile emme havası sıcaklığı artırıldığında hem motor ilk harekete geçiş süresinde önemli azalmalar görülmüş hem de zararlı egzoz emisyonları önemli seviyede azaltılmıştır. Emme havası sıcaklığı 10°C, 20°C, 40°C, 50°C, 60°C' sıcaklığa sahip olan FDM'lerden sağlanmıştır. Motor karakteristiklerini belirlemek adına giren hava sıcaklığı, motor egzoz gazı sıcaklığı, motor soğutma suyu çıkış sıcaklığı, çevre havası sıcaklığı ölçülmüştür. Diğer yandan egzoz emisyon karakteristiklerini belirlemek için karbon monoksit (CO), azot oksitler (NO_x) ve hidrokarbon (HC) değerleri ölçümü yapılmıştır.

Bu sistem sayesinde farklı bir yöntemle dizel motorlarında emme havası sıcaklığı artırılmış. Motor ilk hareket süresi kısalmış. İlk hareket esnasında zararlı emisyon üretimi düşmüştür. Motor daimi çalışma şartlarına ulaşana kadar tüketilen yakıt miktarı azaltılmıştır.

2014, 93 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Dizel Motorlar, Soğukta İlk Hareket, Faz Değiştiren Maddeler (FDM), Emme Havası Sıcaklığı, Egzoz Emisyonları

ABSTRACT

MS Thesis

USING OF PHASE CHANGE MATERIALS IN DIESEL ENGINES TO FACILITATE STARTABILITY AND TO ENHANCE THE EXHAUST EMISSION CHARACTERISTICS IN COLD CONDITIONS

Galip KALTAKKIRAN

Atatürk University
Graduate School of Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering
Department of Energy

Supervisor: Prof. Dr. M. Akif CEVİZ

During the last two decades, the diesel engine performance and drivability have improved continuously. Nevertheless, one of the disadvantages of diesel engines is related to the difficulties for starting at cold conditions. Additionally, the harmful exhaust emissions are also significantly important levels during the cold start conditions. Most of carbon monoxide (CO) emissions from diesel engines are produced during the engine warm-up period. In order to improve the cold start characteristics of diesel engines, many measures have been proposed, such as glow plugs and air heaters in air intake lines.

In this study, in order to increase the cold start performance and improve the exhaust emission characteristics of a direct injection diesel engine, phase change materials (PCM) were used. PCMs, which have high heats of fusion, absorb latent energy before melting or solidifying. During the phase change, temperature of PCMs remains nearly constant. In this study, a PCM was used with the certain melting temperature band in a heat exchanger. Engine cooling fluid was circulated in the exchanger and used as heat source in order to melt the PCM. Engine intake air was passed through the exchanger before engine intake manifold. During the engine cooling period, the PCM in the heat exchanger supported to increase the cooling time period of engine intake air.

The tests were carried out on a two cylinder, mechanical injection diesel engine and favorable results have been observed. When the intake air temperature has been increased by using PCM in the exchanger, the cold start period of engine has been decreased and the harmful exhaust emissions has been decreased at a certain level. Intake air temperature, which at 10°C, 20°C, 40°C, 50°C, 60°C, were provided from FDMs. In order to determine the characteristics of the motor, inlet air temperature, engine exhaust gas temperature, engine coolant outlet temperature, ambient air temperature have been measured. On the other hand to determine the exhaust emission characteristics, carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NO_x) and hydrocarbons (HC) emissions have been measured.

Thus the system the engine intake air temperature by a different method has been increased. The time of cold start period decreased. The harmful exhaust emissions during at cold start has been reduced. The amount of fuel consumed has decreased until the engine reach to operating regime.

2014, 93 pages

Keywords: Diesel Engines, Cold Start, Inlet Air Temperature, Phase Change Material (PCM), Exhaust Emissions

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının gerçekleşmesinde büyük önem arz eden, bilgi ve deneyimleriyle sürekli olarak birçok yönde yol gösteren, çalışkanlığı, anlayışı ve sabrıyla bana daima örnek olan ve her türlü durumda yardım ve desteklerini esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. M. Akif CEVİZ'e teşekkürü bir borç bilirim.

Tez sürecinde deney çalışmalarımı yaparken önerileriyle yol gösteren değerli araştırma görevlisi arkadaşlarıma, bütün bu eylemlerin oluşup hayata geçmesinde büyük rol oynayan, hayatım boyunca her alanda ve her zaman sürekli benden desteklerini esirgemeyen çok kıymetli aileme teşekkürlerimi sunarım.

Galip KALTAKKIRAN

Nisan, 2014

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iv
SİMGELER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Dizel Motorların Soğukta İlk Hareketini Kolaylaştırmak İçin	
Yapılan Çalışmalar	4
1.2. PCM Kullanılarak Dizel Motorların Soğukta İlk Hareketini	
Kolaylaştırmak ve Egzoz Emisyonuna Olan Etki İçin Yapılan Çalışmalar ...	12
1.3. Amaç.....	18
1.4. Kapsam	20
2. KURAMSAL TEMELLER.....	21
2.1. Dizel Motorların Soğuk Çalışma Problemi	25
2.1.1. Kızdırma Bujileri ve Emme Havası Isıtma Sistemleri	26
2.2. Dizel Motorlarda Egzoz Emisyonları ve Hava Kirliliği.....	27
2.2.1. Hidrokarbonlar (HC)	28
2.2.2. Karbonmonoksit (CO).....	29
2.2.3. Nitrojen oksitler (NO _x).....	30
2.2.4. Partikül maddeler (PM).....	32
2.2.5. Sülfür	33
2.3. Faz Değiştiren Maddeler (FDM).....	33
2.3.1. Faz değiştiren maddelerin özellikleri	34
2.3.1.a. Termal özellikler.....	36
2.3.1.b. Fiziksel özellikler	36
2.3.1.c. Kinetik özellikler	37
2.3.1.d. Kimyasal özellikler.....	38
2.3.1.e. Ekonomik özellikler	38

2.3.2. Faz değiştiren maddelerin sınıflandırılması	39
2.3.2.a. Organik faz değiştiren maddeler.....	40
2.3.2.b. İnorganik faz değiştiren maddeler	44
2.3.2.c. Organik ve inorganik ötektik bileşikler	47
2.3.3. Faz değiştiren maddelerin kullanım alanları ve uygulamaları	49
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	50
3.1. Deney Düzeneneğinin Tanıtılması ve Kullanılan Ölçüm Aletleri	50
3.1.1. FDM ile doldurulmuş ısı değiştirici	54
3.1.2. Veri iletişim kartları ve amplifikatör.....	59
3.1.3. Motor krank açısı sensörü	62
3.1.4. Güç ölçüm ünitesi (hidrolik fren).....	62
3.1.5. Piezo basınç çeviricisi	63
3.1.6. Egzoz emisyon cihazı.....	64
3.1.7. İslilik ölçme cihazı	65
3.1.8. Sıcak su tankı ve ısı değiştiricisinde kullanımı	66
3.1.9. Deneylerde kullandığımız FDM ve özellikleri.....	67
3.2. Deneysel Yöntem	68
4. ARAşTIRMA BULGULARI ve TARTIşMA.....	71
4.1. Farklı FDM Sıcaklıklarının Motor Sıcaklık Karakteristikleri Üzerine Etkisi	71
4.2. Farklı FDM Sıcaklığının Egzoz Emisyon Karakteristikleri Üzerine Olan Etkisi.....	78
4.3. FDM’li ve FDM’siz Plakaların Yüzey Sıcaklıklarının Zamanla Değişimi....	84
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	87
5.1. Sonuçlar	87
5.2. Öneriler	89
KAYNAKLAR	90
ÖZGEÇMİş	94

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

a_m	Faz değişim katsayısı
b_e	Özgül yakıt sarfiyatı (g/kW.h)
CH_4	Metan gazı
C_nH_{2n+2}	Normal parafin
C_8H_{38}	Parafin okta dekan
CO	Karbon monoksit gazı
CO_2	Karbon dioksit gazı
C_p	Özgül ısı
F	Kuvvet (N)
h	Entalpi
H_2	Hidrojen gazı
HC	Hidrokarbon
H_2O	Su
H_2S	Hidrojen sülfür
m	Kütle
N_2	Azot gazı
nm	Nanometre
NO	Azot monoksit
NO_2	Azot dioksit gazı
NO_x	Azot oksit gazları
O_2	Oksijen gazı
O_3	Ozon gazı
OH	Hidroksit
P	Basınç (kPa)
PM	Partikül madde
Ppm	Milyonda bir parça
S	Kükürt
SO_2	Kükürtdioksit gazı
V_h	Yanma odası hacmi (m^3)
V_c	Strok hacmi (m^3)
W	İş (kJ)
$X.nH_2O$	Tuz hidratlar
ϕ	Eküvalans oranı

Kısaltmalar

AB	Avrupa birliği
AÖN	Alt ölü nokta
CI	Sıkıştırma Ateşlemeli
DI	Direkt enjeksiyonlu
ECD-U2	Multi enjeksiyonlu beslemenin
EGR	Egzoz gazı resirkülasyonu
Euro3	Avrupa emisyon normları

E&PR	Buharlaştırma ve basınç regülatörü
FDM	Faz değiştiren maddeler
FTP75	Federal test prosedürü
LPG	Likid petrol gazı
MVEG-A	Motorlu araç emisyon grubundan
TES	Termal enerji depolama sistemi
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
ULEV	Ultra düşük emisyonlu araç
ÜÖN	Üst ölü nokta

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Soğuk ve sıcak çalışma boyunca emisyon oranları	8
Şekil 1.2. Soğuk çalıştırmada CO ve NO grafikleri.....	12
Şekil 1.3. Soğuk çalışma problemi için tasarlanan ısı bataryası	13
Şekil 1.4. Motorun ısınma çevrimi.	14
Şekil 1.5. Vakum yalıtımlı katalitik konvertör.	16
Şekil 1.6. Deneysel ısı depolama sisteminin şematik gösterimi.	17
Şekil 2.1. Motor çevrimi	23
Şekil 2.2. Eküvalans oranıyla egzoz emisyonların değişimi.....	30
Şekil 2.3. Hal değişim grafiği.	35
Şekil 3.1. Deney motoruna ait görünüm	51
Şekil 3.2. Deney düzeneğinin şematik görünümü	52
Şekil 3.3. LabVIEW programının ön panel ve blok diyagrama ait görüntü	53
Şekil 3.4. Isı değiştiricisinin işleme tabi tutulmadan önceki ilk hali	54
Şekil 3.5. Isı değiştiricisinin Solidworks programında modellenmesi	54
Şekil 3.6. Isı değiştiricisinin işleme tabi tutulduktan sonraki hali	55
Şekil 3.7. İçerisinde FDM doldurulmuş bakır kutular	55
Şekil 3.8. İçerisinde ısı değiştiricisinin sabitleneceği muhafazanın görünümü	56
Şekil 3.9. Isı değiştiricisi ve muhafaza	57
Şekil 3.10. Hazırlanan ısı değiştiricisine ait görünüm	57
Şekil 3.11. Hazırlanan sistemin ilk deneme yapımına ait görünümü.....	58
Şekil 3.12. Deney öncesi hazır hale gelen ısı değiştiricisi ve muhafaza.	58
Şekil 3.13. KISTLER marka bir amplifikatör.....	59
Şekil 3.14. PCI-6259 veri iletişim kartı.	60
Şekil 3.15. PCI-6250 veri iletişim kartı.	61
Şekil 3.16. Advantech PCL 818 HG kartı ile sıcaklık ölçümleri.....	61
Şekil 3.17. Hidrolik frene ait şematik görünüm.....	63
Şekil 3.18. Egzoz emisyon cihazı.	65
Şekil 3.19. İslilik oranı tespit cihazı.....	66
Şekil 3.20. Su tankı ve pompanın gösterimi.	67

Şekil 4.1. Deney düzeneğinin şematik görünüşü	72
Şekil 4.2. FDM'nin ısıtılmadığı durumda sıcaklık değişimleri	73
Şekil 4.3. FDM'nin 20°C olması durumunda sıcaklık değişimleri.....	74
Şekil 4.4. FDM'nin 40°C olması durumunda sıcaklık değişimleri.....	75
Şekil 4.5. FDM'nin 50°C olması durumunda sıcaklık değişimleri.....	76
Şekil 4.6. FDM'nin 60°C olması durumunda sıcaklık değişimleri.....	77
Şekil 4.7. Farklı FDM sıcaklıkları için CO emisyonu değişimi	79
Şekil 4.8. Farklı FDM sıcaklıkları için CO ₂ emisyonu değişimi	80
Şekil 4.9. Farklı FDM sıcaklıkları için NO emisyonu değişimi	81
Şekil 4.10. Farklı FDM sıcaklıkları için HC emisyonu değişimi	82
Şekil 4.11. Farklı FDM sıcaklıklarının egzoz gazı sıcaklığına olan etkisi	83
Şekil 4.12. FDM'li ve FDM'siz plakaların yüzey sıcaklıklarının muhafazasız olarak normal çevre şartlarında soğuma grafiği.....	84
Şekil 4.13. FDM'li ve FDM'siz plakaların yüzey sıcaklıklarının eşanjör içerisinde olması durumunda normal çevre şartlarındaki soğuma grafiği.....	85

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Dizel binek otomobiller için Euro emisyon standartları (g/km).....	3
Çizelge 1.2. Multi enjeksiyonun faydaları.....	6
Çizelge 2.1. Faz değıştiren maddelerin sınıflandırılması.....	39
Çizelge 2.2. Parafin karışımlara ait üreticilerin verdiği fiziksel bazı özellikler	42
Çizelge 2.3. Yağ asitlerinin düşük sıcaklıktaki fiziksel özellikleri.....	43
Çizelge 2.4. Bazı tuz hidratlara ait fiziksel özellikler	45
Çizelge 2.5. Bazı metalik FDM'lere ait özellikler	47
Çizelge 2.6. Bazı organik ve inorganik ötektik bileşiklerin fiziksel özellikleri.....	48
Çizelge 3.1. Deneylerde kullanılan motorun teknik özellikleri.	50
Çizelge 3.2. Deney düzeneğinin tanıtımı.....	52
Çizelge 3.3. FDM maddesinin ısı değıştiricisinde kullanım miktarları.	59
Çizelge 3.4. Egzoz emisyon cihazının ölçüm aralığı ve hassasiyeti.....	65
Çizelge 3.5. Deneylerde Kullandığımız FDM'nin Özellikleri.	68
Çizelge 4.1. Deney düzeneğinin numaralandırılması.	72
Çizelge 4.2. Kullanılan termo çiftlerin yerleri ve isimleri.	72

1. GİRİŞ

Her geçen gün artış gösteren dünya nüfusunun, sürekli gelişmeye devam eden endüstrileşmenin, hızlı adımlarla büyüyen ülke ekonomilerinin, ağır sanayinin, artan ulaşım ya da taşımacılık, ısınmanın, aydınlanmanın olsun bütün bunların merkezinde enerji tüketimi yer almaktadır. Tüm bu ihtiyaçlar ise büyük oranda fosil yakıtlar üzerine odaklıdır. İşte bu ihtiyaçlar mutlak olarak bazı temel problemleri de gözler önüne sermektedir. Öncelikli bu problemlerin başında yer alan çevre ve hava kirliliği diyebiliriz. Bir diğeri içinde artan enerji bağımlılığıyla orantılı olan, sınırlı enerji kaynaklardan dolayı artan enerji maliyetleri denilebilir.

Elbette ki bir şekilde bütün bu enerji ihtiyaçlarına cevap verilmeli ve ortaya çıkan problemlerinde çözümüne yönelik arayışlar gerekmektedir. Bu yüzden bu ihtiyaçların giderilme gayesi mevcut kaynakların en verimli ve olabildiğince doğru şekilde kullanımını doğurmuştur. Böylece bu yönelimin temel nedenlerinden birisi olan hava kirliliğine olan etkiyi de en aza indirebilme odaklı çalışmalar ortaya çıkmıştır.

Bilindiği üzere fosil yakıt bileşenleri hava ve çevre kirliliği adına büyük bir potansiyele sahiptir ve doğayı tehdit eden telafisi olmayan problemlere yol açabilir. Bu çevresel problemlerin oluşmasında günden güne büyük pay sahibi olan, ulaşım ve taşımacılık sektörünün kalbinde yer alan içten yanmalı motorlar ve onların neden olduğu egzoz emisyonlarıdır. Günümüzde kendi ülkemizde neredeyse her yıl trafikte artan araç sayısının 765 000 ile 1 000 000 arasında değiştiğini dile getirirsek (TÜİK 2011-2013) ve soğuk ikliminde büyük pay sahibi olduğu ve günlük trafikteki dur kalklarında düşündüğümüzde aslında bu problemin ne denli çözüme ihtiyacı olduğu kolayca anlaşılmaktadır. Bu zararlı etkiyi azaltmak için büyük firmalar değişik çözüm teknikleri üzerine yoğunlaşmış, farklı ülke ve bölgelerde değişik standartların yanında anlaşmalar uygulanmaya başlanmıştır. Bunlardan biriside geniş çapta uygulama alanı olan, karbon salınım değerlerini kontrol altına almak adına imzalanmış Kyoto Protokolüdür.

Egzoz emisyonları bakımından içten yanmalı motorlar ele alındığında kullanılan yakıt türüne göre değişik karbon oranlarına sahiptirler ve bu motorlar en büyük zararlı etkiyi ilk çalışmada vermektedirler. Soğuk havalarda çalıştırılan, özellikle soğuk iklimin uzun süre yaşandığı yerlerde içten yanmalı motorlarda soğuk çalıştırma problemiyle karşılaşılır. Bu motorlardan biriside dizel yakıt kullanan sıkıştırma ateşlemeli motordur. Gelişmiş teknolojileri, yüksek tork ve motor performans özellikleri nedeniyle son yirmi yılda dizel motorların üretimi ve kullanımı önemli ölçüde artmıştır (Çelik *et al.* 2013).

Ancak dizel motorların soğuk çalışma durumundaki artış gösteren emisyon ve yakıt tüketimi yeni çözüm yöntemlerini de beraberinde getirmiştir (Gümüş vd 2003). Dizel motorlar, buji ateşlemeli motorlar ile karşılaştırıldıklarında ise düşük yakıt tüketimleri sayesinde daha az karbon dioksit (CO₂) emisyonu ürettikleri için daha çevreci bir motor olarak nitelendirilir (Çelik vd 2011). Ayrıca Vasiliev (2000) göre bu yakıt tüketiminin, egzoz gazlarındaki CO ve CnHn konsantrasyonunun artmasını, motorun geç cevap vermesini ve akü üzerinde aşırı yükleme problemlerini doğurduğunu öne sürmüştür. Diğer yandan Gümüş (2009) yağlayıcı madde viskozitesinin artışı, harekete karşı direnç artışını ve titreşimlerle birlikte motorda gürültüyü de artırmaktadır. Bununla birlikte Uğurlu (2008) kendi çalışması içerisinde motorun çalışmasını izleyen ilk iki dakika içerisinde, oluşan toplam HC emisyonlarının %80'den fazlasının ve CO oranlarının ise %50'den fazlasının salındığına dair çeşitli çalışmalar yapıldığından bahsetmiştir.

Tüm bu gelişmelere rağmen dizel motor endüstrisinde, 0°C'den daha düşük sıcaklıklarda soğukta ilk hareket ve kararlı rejime geçinceye kadar olan ısınma davranışı önemli bir kriter olarak kalmaya devam etmiştir. Dizel motorlarında soğuk ilk çalışma ve ısınma esnasındaki çalışma koşulları ideal çalışma koşullarından çok farklıdır. Bu koşullarda motor kararlı olarak çalışmamakta, gürültü önemli ölçüde belirginleşmekte ve kirletici emisyonlar artmaktadır (Çelik 2012).

Motorun günlük olarak çalışması varsayılarak yukarıda da bahsettiğimiz gibi her gün artan araç sayısını da düşünürsek soğuk çalıştırma probleminin önemini anlamak daha kolay olmaktadır (Henein and Tagomori 1999).

Avrupa emisyon normları olan Euro3, Euro4 ve ABD emisyon normu olan FTP75 (Federal test prosedürü) yaptığı emisyon testlerinde soğuk çalıştırma esnasında oluşan salınım değerlerini de kapsamaktadır (Henein and Tagomori 1999). Ayrıca Euro4 ve ULEV (Ultra Low Emission vehicle) gibi standartlar ise çevre kirliliği ve enerji tüketimine karşı daha fazla önem vermektedir. Bundan dolayı aşağıda Çizelge 1.1’de bazı standart değerleri verilmiştir (Anonymous 2013).

Çizelge 1.1. Dizel binek otomobiller için Euro emisyon standartları (g/km)

Aşama	Tarih	CO	HC	HC+NO _x	PM
Euro 1	1992/07	2,72	-	0,97	0,14
Euro 2	1996/01	1	-	0,7	0,1
Euro 3	2000/01	0,64	-	0,56	0,05
Euro 4	2005/01	0,5	-	0,3	0,025
Euro5a	2009/09	0,5	-	0,23	0,005
Euro 5b	2011/09	0,5	-	0,23	0,005
Euro 6	2014/09	0,5	-	0,17	0,005

Yanma prosesi ve yanma sonucu oluşan egzoz emisyonları arasında bir ilişki olduğu bilinmektedir. Buji benzinli motorların aksine dizel motorlarda hava ve yakıtı ateşlemede kullanılmaz. Dizel yakıt benzinle kıyaslandığında daha düşük uçuculuğa sahiptir fakat hava içerisine kolay karışmadığı gibi benzine göre daha kolay ateşlenir. Bu ateşlemeyi birçok faktör etkiler ve bunlar çalışma sistemi, motor dinamikleri, yanma prosesleri olarak sıralanabilir. Dizel motor çalışmasını etkileyen önemli parametreleri: Batarya şarjı ve çalıştırma karakteristikleri, motor dizaynı, yüzeyle hacim oranı, turbülans, materyal, sıkıştırma oranı, valf zamanı, yağlama yağı viskozitesi, enjeksiyon sistemi ve blow-by oranı, yakıt özellikleri, hava sıkıştırma özellikleri ve dahası olmak üzere sıralanabilir (Henein 1997).

1.1 Dizel Motorların Soğukta İlk Hareketini Kolaylaştırmak İçin Yapılan Çalışmalar

Soğukta ilk hareket ve emisyon problemlerini azaltmak adına özellikle son yıllarda artış gösteren yoğun araştırmalar sürdürülmektedir. Bu çalışmalardan bazıları hakkında bilgiler verilmiştir.

Zahdeh *et al.* (1990) bir dizel motorundaki yanmayı soğuk çalıştırma şartları altında normal ve sınır çizgi şartlarında olarak araştırma yapmışlardır. Yapılan deneyler, tek silindirli, hava soğutmalı, 4 zamanlı bir motor üzerinde ve soğuk bir odada yönetilmiştir. Testler, farklı yakıtları, enjeksiyon zamanlarını ve ortam sıcaklıklarını kapsamıştır. Çalışmalarında aldıkları izlenim şöyledir: Öteki başlangıç parametreleri sabit tutulurken, yakıt enjeksiyon desteği olmayan deneylerde sıkıştırma basıncı ve sıcaklık değerinin, ortam sıcaklığına ve ilk çalışma devir sayısına bağlı olduğudur. Düşen ortam sıcaklığı, sürtünme torkunda yükselişe ve devir sayısında düşüşe neden olmuştur. Yakıt enjeksiyonu olmaksızın sıkıştırma basıncı ve sıcaklığı, devir hızına artar ve böylece blow-by ve ısı transfer kayıplarında düşüş gerçekleşir. Ayrıca 0°C'nin üzerindeki çevre sıcaklıklarında 4 stroklu çevrimin çalışması gözlemlenmiştir. Bu şekilde bir kademe düşüşü yapılarak sıcaklığın düşmesinde 8 stroklu çevrimli moda ve daha fazla düşerse 12 stroklu duruma ve 16 stroklu çevrim durumuna çalışmak için yönelim olmuştur. 12 stroklu çevrimli durumda ilk çalışma teşebbüsü boyunca -10°C ortam sıcaklığında tekrarlanmıştır. Daha sonra benzer şekilde bu farklı çevrimlerin tekrarlandığı ve farklı ortam sıcaklığına odaklı olarak yapılabilirliğini belirtmişlerdir.

Henein *et al.* (1992) çalışmaları hava soğutmalı, 4 zaman çevrimli, direk enjeksiyonlu, tek silindirli bir motorun soğuk çalışması boyunca oluşan yanma karasızlığı üzerinedir. Deneyler farklı enjeksiyon zamanı ve farklı ortam hava sıcaklığında farklı özellikli yakıtları kapsamaktadır. Analizde görülen yanmanın gerçekleşmemesi durumu tekrarlanabilir ancak rastgele değildir. Motor önce tek sefer 8 strok çevrimli çalışma ya da iki defa 12 stroklu çalışmaya ya da daha fazla kez atlayabilir. Motor bir çalışma modundan diğerine geçebilir ve finalde 4 stroklu çevrim üzerine sürekli çalışabilir.

Bütün test edilen yakıtlar farklı derecelerde yanmanın gerçekleştiği çalışmada üretilmiştir. Yanma kararsızlığının nedenleri analiz edildi ve devir sayısı, kalan artık gaz sıcaklığı ve bileşimi, biriken yakıt ve ortam hava sıcaklığıyla ilişkili olduğu bulunmuştur. Çalışma bulgularını ise şöyle değerlendirmişlerdir: Soğuk çalıştırma boyunca olan yanma kararsızlığı rastgele bir süreç değildir. Motor farklı stroklu çevrimlere atlayarak tekrarlanabilir yapıyı takip eder. Motor bir moddan diğerine daha az çevrim atlama ile birlikte değişir. Bütün hidrokarbonlar yakıtlar farklı uçuculuğa, farklı setan sayısına, yoğunluğa, düşük ortam sıcaklığında yanma kararsızlığına sahiptir. Bu kararsızlık ya kısmen ya da bütün olarak yanmanın gerçekleşmediği misfiring durumlarına sebep olur. Ortam sıcaklığındaki düşüşle birlikte atlayan çevrim sayısı da azalır. Yanmanın gerçekleşmeme nedenlerinin sonrasında görünen yakıt buharının eksikliği, oksijenli karışım, kendiliğinden tutuşma sonrası yanma prosesinin devamını getirmek için gerekir. Bu durum silindirlerde mevcut olan yakıtın dalgalanması, gaz sıcaklığı ve basıncı ile ilgilidir.

Mohr and Urlaub (1994) bu konuyla ilgili bir çalışma yapmışlardır ve bir buji ateşleme sistemini girdaplı yanma odası olan bir dizel motor üzerine adapte etmişlerdir. Bu sistem ile uzun tutuşma gecikmesinden kaynaklanan uygun olmayan soğuk çalışma kalitesini iyileştirmek hedeflenmiştir. Çalışmalarını şu şekilde özetlenebilir: Bu sistem ile yakıt ve hava karışımı ateşlenip, ön ısıtmaya gerek kalmadan motorun hızlı bir başlangıç yapması sağlanmış. Bujiler kullanılırsa yanmamış hidrokarbonların emisyonlarının önemli derecede azaldığı ve böylece HC miktarı kızdırma bujisi versiyonuna göre %80 oranla azalma değeri göstermiş. Ön ısıtma işlevi görmeyen bu sistem, kızdırma sisteminin enerjisinin sadece %10 kadarını enerji tüketmekte. Ayrıca belirtildiğine göre, ateşleme bujisi kullanarak soğuk çalıştırmanın güvenliği muhtemel sıkıştırma oranının değerini de azaltacağını göstermiştir. Bu tema ile ilgili yapılan özel araştırma sonuçlarında görülmüş ki orada bir ateşleme sistemi kullanıldığında da bir problem olmayıp hatta olsa bile sıkıştırma oranı değerinde düşüş olabilir. Çalışma kalitesinin oldukça iyi değerde olduğu ve daha iyi bir özgül yakıt tüketimi ile düşük kurum sayısı olarak avantajlar elde edilmiştir.

Osuka *et al.* (1994) yaptıkları çalışma çok silindirli bir dizel motorunun soğuk koşullarda yanma mekanizması ve egzoz emisyon değerleri üzerine olmuştur. Soğuk çalışmada dizel motorun performansını iyileştirmek için “ECD-U2” olarak adlandırılan diğer bir ifade ile ortak bir şekilde yakıt beslemek için “multi enjeksiyon” diye bir yol izlemişlerdir. Yeni bir kavram üzerine dayalı olan bu sistem enjeksiyon basıncı için esnek bir şekilde yüksek elektronik kontrole, enjeksiyon miktarına, zamanına ve enjeksiyon oranına sahiptir. Çalışmalarında, direk enjeksiyona sahip motorda motor soğukken uzayan ateşleme gecikmesinden dolayı yanmanın gerçekleşmediği fakat kalan yakıtlar birleşince de ateşleme art arda sürdüğünü, ECD-U2 sisteme sahip pilot enjeksiyon beyaz duman emisyonun yarından fazlasını azaltmış ve beyaz duman emisyon süresini de geleneksel enjeksiyona sahip motorla kıyaslandığında 1/10’una kadar indiğini, beyaz dumanı azaltmada muhtemelen en öneme sahip olanın ise pilot enjeksiyon kullanılarak ana enjeksiyon öncesinde yanma odası sıcaklığını yükseltmek ve böylece enjeksiyon için gerekli minimum enjeksiyon miktarının da azalacağını ayrıca her çevrimde ana enjeksiyondan önce bir soğuk alev reaksiyonu uyarmak için ayrık enjeksiyon kullanarak bir motorun soğuk çalışması önemli derecede gelişebileceğini belirtmişlerdir. Aşağıdaki tabloda multi enjeksiyonlu beslemenin motora olan faydaları mevcuttur.

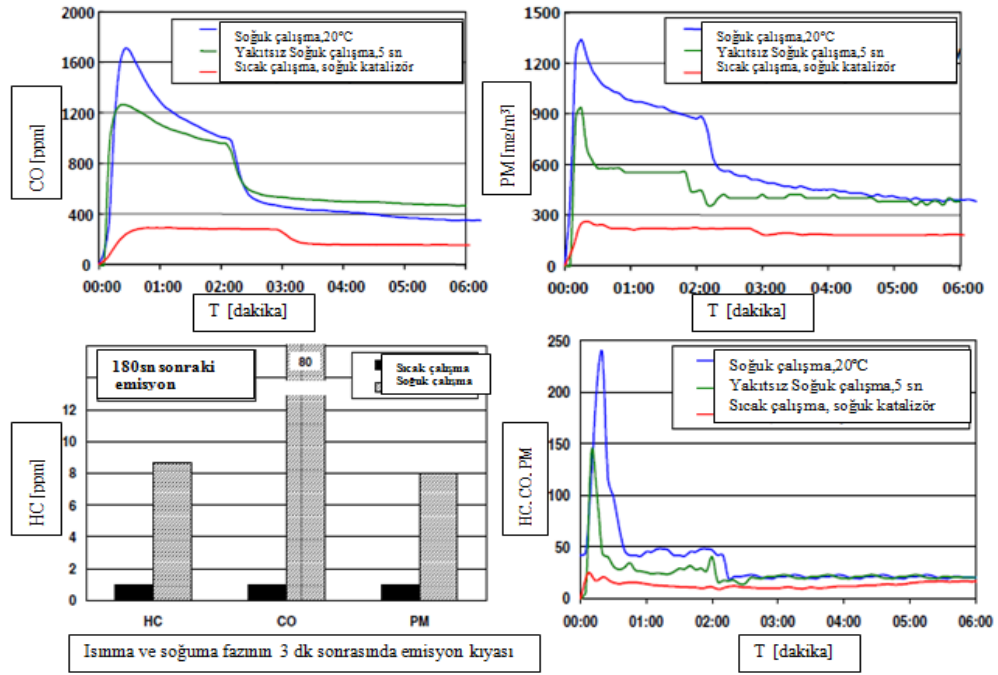
Çizelge 1.2. Multi enjeksiyonun faydaları (Osuka 1994)

Hedef	Faydalar
Gürültülü yanmayı azaltma	90dBA’ dan 81 dBA / silindir basınç değeri 4dBA
NO _x azaltma	Bütün yüzde miktarında azaltma olabilirliği
Soğukta çalıştırma yeteneği	25 s’ den- 8 s’e kadar
Beyaz dumanı azaltma	63s’ den - 5 s’e kadar

Ogawa *et al.* (1999) yapmış oldukları çalışmada bir direkt enjeksiyonlu dizel motorunun çalışması boyunca egzoz gaz emisyonlarındaki değişimleri incelemişlerdir. Küçük bir dizel DI dizel motor üzerinde ki bu araştırmada çalışma boyunca egzoz gaz emisyonları

üzerine yapılmıştır. Piston boşluğu üzerindeki yüzey sıcaklığı ile aynı anda emisyon ve yüzey sıcaklığı arasındaki ilişkiyi değerlendirmek için termokupllar ile ölçülmüş ve motor çalışma parametreleri ve yakıt özelliklerine etkisi tartışılmıştır. Çalışmalarında, ilk çalışmadan yaklaşık olarak 6 çevrim hemen sonrasında yüksek bir zirve değeri görülmüş, yaklaşık 50 çevrime kadar azalarak devam etmiş ve yine yaklaşık 1000 çevrimden sonra sürekli bir değerde seyretmiştir. NO_x deki değişiklik, toplam HC ye göre çok daha az değerlerde olmuştur. Yanma odası duvarları üzerinde biriken yakıt bir maksimum değere eriştiğinde sonra 50 ile 200 çevrim sonrasında toplam HC konsantrasyonunda artış ve ondan sonra yaklaşık 1000 çevrim sonrasında sabitleşmeye başlamasıyla neredeyse piston duvarlarının yüzey sıcaklığının sabit kaldığı gözlenmiştir. NO_x motor çalışmasının yaklaşık 6 çevrim sonrasında yüksek zirve değeri göstermiş ve sonrasında ani bir şekilde düşerek 1000 çevrim civarında sabitleşme yönelimine girmiştir. Toplam HC miktarı ile egzoz kokusu arasında ilişki görülmüş ve yaklaşık 50 çevrimde maksimum bir noktaya ulaşmıştır. Artan yakıt enjeksiyonuna istinaden toplam HC önemli bir şekilde artış göstermiştir.

Bielaczyc (2001) direk enjeksiyonlu bir dizel motorda, motorun ilk çalışmasındaki emisyonları araştırmıştır. Çalışmalarını soğuk şartlar altında yani soğutma suyunun ve madeni yağın sıcaklığının ortam sıcaklığı ile aynı olduğu durumda ve sıcak çalışma modunda yani sıcaklık kararlı hale geldiği durumda yapmıştır. Çalışmasında soğuk çalıştırma boyunca emisyon kontrolü temelde yanmamış HC, CO ve partikül madde ile ilgili olduğunu belirtmiş. Arzu edilmeyen zararlı emisyonların temel nedeni olarak düşük sıcaklık olduğunu, çalışma sıcaklığına ulaşana kadar motorun başlangıç safhasını takiben soğuk çalışması devam ettiği sürece oluştuğunu gözlemlemiştir. Aşağıda Şekil 1.1.'de çalışmanın sonuçlarına dair grafiksel açıklamalara yer verilmiştir.



Şekil 1.1. Soğuk ve sıcak çalışma boyunca emisyon oranları (Bielaczyc 2001)

Çalışma verilerini şu şekilde yorumlamıştır: Soğuk ve sıcak çalışma emisyonunda en büyük farklılığın ilk iki dakika boyunca egzoz gazındaki emisyonun konsantrasyonunun 1000 ppm olup sıcak çalışmada oluşan miktarın ise ihmal edilebilir olduğudur. Soğuk çalışmada motorun tüm yaydığı emisyonun ilk 60 saniye süresince partikül maddenin %53, CO ve hidrokarbonların ise %41' ini oluşturduğunu dile getirmiştir. İlk üç dakika içerisinde bu miktarların %16 PM, %21 ise CO ve HC olduğudur. Soğuk çalışma esnasındaki egzoz gazlarındaki salınan bileşenlerin miktarının sıcak çalışmada elde edilene göre çok daha fazla olduğunu görmüştür. CO, HC ve PM arasında kıyaslama yaptığında motor çalışmasını takip eden ilk üç dakikada salınan miktarların birkaç kat arttığı sonucunu görmüştür.

Liu *et al.* (2003) çalışmalarında soğuk çalışma problemini daha iyi anlamak adına doğal soğutmalı direkt enjeksiyonlu tek silindirli bir dizel motorunda sürekli ve geçici soğuk ilk çalışma prosesi için bir bilgisayar simülasyon modeline yer vermişlerdir. Model, deneysel olarak onaylanmış ve motorun çalışma sonrası süresini ve yanma kararsızlığını etkileyen temel parametreleri belirlemek için kullanılmıştır. Yanma odası cidarlarına

çarpmadan önceki ve sonraki yakıt spreyinin davranışı, soğuk çalışma durumundaki her bir çevrim boyunca analiz edilmiştir. Bu analiz, yanma odasında biriken yakıtın, motor sıkıştırma basınç ve sıcaklığını artırmak ve tutuşma gecikmesi periyodu boyunca yanma odasındaki yakıt buharlaşma konsantrasyonunu artırması aracılığıyla motorun soğuk çalışması üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Bir "Oto tutuşma Endeksi" (AI), dizel motorun ilk ateşleme döngüsünü belirlemek amacıyla tanıtılmış ve ayrıca dizel motor yanma kararsızlığı detaylıca analiz edilmiştir. Model, ateşlemeden sonraki yanmanın gerçekleşmemesine motor dinamiği ve yanma kinetikleri arasında dengesizliğin sebep olduğunu göstermiştir. Ani motor hız değişimlerinin model tahminleri soğuk çalıştırma süresince deneysel olarak aynı eğilimde olduğu görülmüştür.

Broatch *et al.* (2008) binek otomobiller için bir motorlu araç emisyon grubundan (MVEG-A), dizel bir motorun yanma süresi boyunca emisyon kirliliğini azaltmak amacıyla emme havası ısıtılmasının potansiyel değerlendirmesini yapmak için bir çalışma hazırlamışlardır. Bu amaçla birlikte, temel emisyon mekanizmasını vurgulamak için motor emisyonları üzerine, istikrarlı şartlar altında giriş sıcaklığının yaklaşık etkileri hakkında kısa bir çalışma yapılmıştır. MVEG-A deneyleri, standart kızdırma bujisi ve giriş manifoldu ön kısmına yerleştirilmiş olan bir hava ısıtıcısıyla yapılmıştır. Çalışmada havanın ısıtılma işleminin, HC ve CO üzerine direkt ve pozitif bir etkiye sahip olduğunu vurgulamıştır. Bu sonuçlar kızdırma bujileri ile kıyasladığında HC 'nin %13, CO'nun % 5 ve NO_x'in ise % 3'lük bir azalmasına izin vermiş, yakıt tüketimi oldukça benzer miktarda olup PM ise sadece %4 kadar kötüleşmiştir. Bu kötüleşme ise bir partikül madde tutucu tuzak kullanarak kolayca telafi edilmiştir. Bu çalışma ile direkt enjeksiyonlu dizel motorların soğuk çalışmasında alternatif sistemler olarak elektrik rezistanslı hava ısıtma sistemlerinin uygun bir sistem olarak bu emisyon değerlerini kontrol etme amacıyla kullanılabileceği kanaatine varılmıştır.

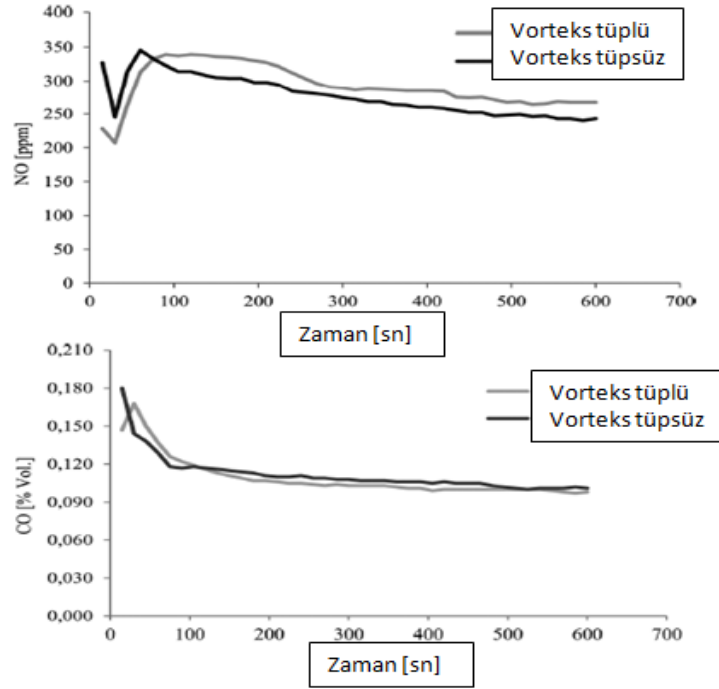
Broatch *et al.* (2010) dizel motorların soğuk çalıştırma koşullarında yakıtın kendi kendine ateşlemesi için silindir içi sıcaklık eşiğini tahmin etmede yeni bir prosedür çalışmalarında sunulmuştur. Bu çalışmada hem deneysel hem de teorik hedefler yeterli

şekilde kombine edilmiştir. Soğuk çalışma testlerini çeşitli ortam sıcaklıklarında, herhangi bir alet olmaksızın motor çalışmaları için minimum ortam sıcaklığını belirlemek adına yapılmıştır. Bu değerler -11°C ve 10°C 'dir. Deneylerde data ölçümlerinde, hesaplamalar için giriş parametreleri ve sınır şartları kullanılmıştır. Almış oldukları sonuçlarına göre söylemleri, yakıt enjeksiyonu öncesinde silindir içinin ısınması ve böylece soğuk çalışmada yanma ısısının yeterince yükselmesi için dizel motorlarda ön ısıtılmalı sistemlerin kullanımının kesinlikle gerekli olduğu savunulmuştur.

Desantes *et al.* (2011) tarafından yapılan çalışmada, soğuk çalışma şartları altında yanmanın ilerlemesi ve ateşlemede enjektör meme geometrisi üzerine yoğunlaşmıştır. Bu çalışma için -20°C dizel motorlu bir yolcu aracında tekrarlanabilir ve sistematik bir şekilde, düşük hız ve sıcaklık şartlarında bunların hepsini gerçekleştirmek için özel olarak bir yapı tasarlamıştır. Araştırma şartları altında başlangıç yanmanın pilot enjeksiyon alevi ile neredeyse tamamen yükseldiğinin sergilemiştir. Bu açık bağıllık bize yanma problemini ateşleme ve ana yanma ilerlemesi olarak iki parçaya ayırmaya izin vermiştir. Ateşleme pilot enjeksiyonla kontrol edilmiş ve sadece görüntüleme ile izlenebilmiştir. Ana yanma ilerlemesi enjeksiyon olayı ile yükselmiş ve yanma görüntüsü yanı sıra klasik silindir içi basınç analizi ile izlenebilmiştir. Enjektör başına enjekte edilen kütle ve hız olmak üzere iki parametrenin pilot ateşleme üzerine açık bir etkisi olduğu gösterilmiş. Benzer yakıt hızında deliğin başına enjekte edilen yakıt miktarını artırarak muhtemelen kızdırma bujisi ve yerel denklik oranını artırmak için yakıtın büyük bir miktarda taşınması ateşleme koşullarını iyileştirmiştir. Artan yakıt hızı kızdırma bujilerinden uzaklaşan piston duvarlarına doğru yakıtın büyük bir kısmının taşınmasıyla önemli şekilde ateşlemenin ihtimalini azalmış ve bu sorun pilot ateşleme şartları düşük basınçta yada kısa enjeksiyon darbeleri kullanılarak geliştirilmiştir. Ana yanma ilerlemesi konusunda, çevrim başına elde edilen işin miktarı ve enjeksiyon olayı ile uyarılan momentum arasında pozitif bir bağımlılık olduğu bulunmuştur. Sonuçta tek pilotlu ve tam enjeksiyonlu sonuçları en azından bu şartlar altında ateşleme ve yanma ilerlemesi için optimum ayarları bulmak, hem tekil pilot enjeksiyon hem de ful enjeksiyon sonuçlarını bunların kapsaması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Pandiyarajan *et al.* (2011) dizel motorundan çekilen, bileşik duyulur ve gizli ısı depolama sisteminde depolanan enerjinin niteliğini ve niceliğini ölçmek için verimli bir yol olarak ekserjinin kullanılmasına yönelik araştırma yapmışlardır. Toplam sistem için enerji ve ekserji dengesini hesaplanmış ve sonuçlar enerji ve ekserji akış diyagramları kullanılarak sunulmuştur. TES sistemi kullanarak yakıt girişinde toplam enerjinin % 15,2'sinin korunduğunu enerji analizinden gözlemlemişlerdir. Ancak ekserji analizinden yakıtın kimyasal kullanılabilirliğinin yalnızca %1,6'sının korunduğu teşhis edilmiş ve bu analizler ile motor performansının iyileştirilmesinin düşük derecede enerjinin geri kazanılmasından daha önemli olduğu gösterilmiştir.

Çelik *et al.* (2013) sadece basınçlı gaz ile çalışan, kontrol vanası hariç hiçbir hareketli parçası olmaya, teğetsel olarak giriş yapan yüksek basınçlı gaz akımını biri giriş gazından daha sıcak, diğeri giriş gazından daha soğuk düşük basınçlı iki akıma ayıran basit mekanik bir cihaz olan vorteks tüpler kullanılmıştır. Çalışmalarında dizel motorlarda soğukta ilk hareket ve emisyon sorunlarını azaltmak amacıyla alternatif olarak vorteks tüplerin kullanımı önermişler ve vorteks tüplü bir dizel motor deney sistemi kurularak dizel motorlarda vorteks tüplerin kullanılmasının soğukta ilk hareketin kolaylaştırılması ve egzoz emisyonlarının azaltılmasına etkisi araştırılmıştır. Deneyler çevre havası ve soğutucu akışkan sıcaklığının 0°C olduğu, vorteks tüplü ve vorteks tüpsüz olarak yapılmış, giren hava sıcaklığı, motor soğutma suyu çıkış sıcaklığı, egzoz gazı sıcaklığı, motor devir sayısı, silindir içi basınç ve egzoz emisyonları ölçülüp ve egzoz emisyonlarından HC emisyonu, CO emisyonu, NO emisyonu ve islilik oranı emisyonları incelenmiştir. Çalışma sonucu değerlendirmeleri şöyle yapılmıştır: Dizel motor soğuk çalıştırma durumu boyunca motor giriş havası sıcaklığı yüksek derecede etkindir, motora giren hava sıcaklığını artırmada vorteks tüpler kullanılabilir, vorteks tüpler ile rölanti hızına ulaşana kadar ki zaman azaltılabilir. Bu olayın vorteks tüp kullanılmadığı ve kullanıldığı durumlar için sırasıyla 18 ve 12 saniye olduğu görülmüştür. Ayrıca motor volümetrik veriminde hava girişinin artan sıcaklığından kaynaklanacak negatif etkileri önlemek adına motorun ısınmış şartlardan sonra bu vorteks tüplerinin devre dışı edilmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Çalışmaya ait grafikler ise aşağıda Şekil 1.2.'de CO, NO analizi verilmiştir.

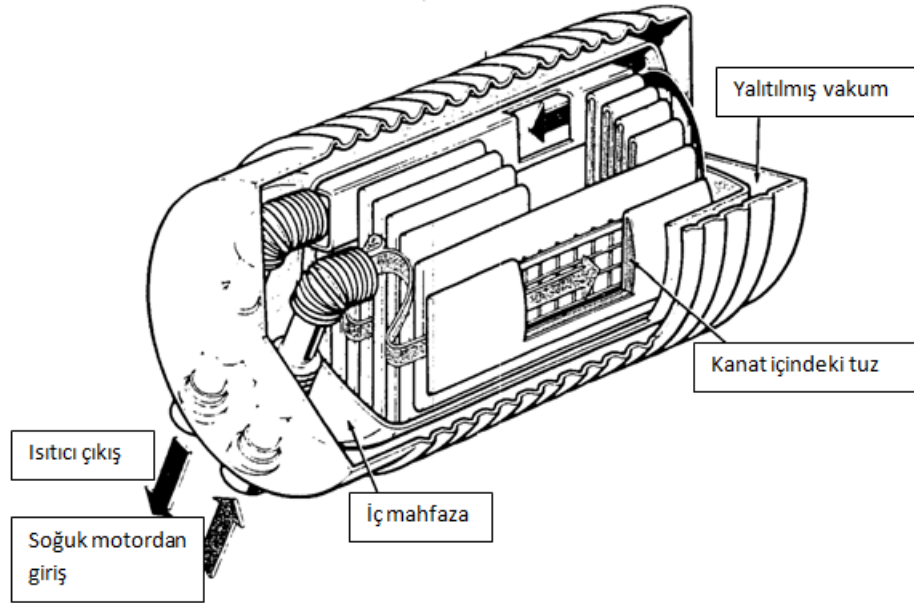


Şekil 1.2. Soğuk çalıştırmada CO, NO grafikleri (Çelik *et al.* 2013)

1.2. FDM Kullanılarak Dizel Motorların Soğukta İlk Hareketini Kolaylaştırmak ve Egzoz Emisyonuna Olan Etki İçin Yapılan Çalışmalar

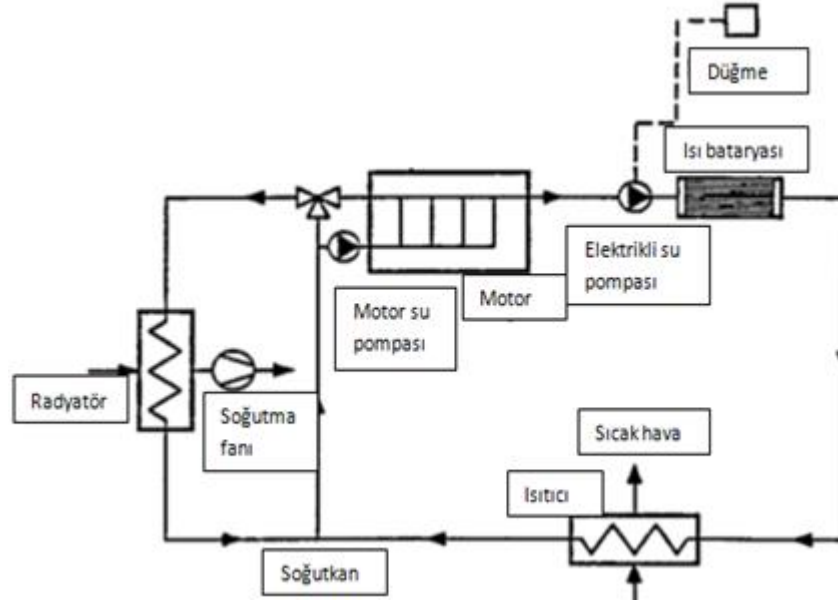
FDM malzemelerinden genel olarak değişik amaçlara yönelik çok çeşitli uygulamalar için faydalanılmıştır. Bu uygulama alanlarından biriside içten yanmalı motorlardır. Dünyanın birçok bölgesinde içten yanmalı motorlardan kaynaklanan çeşitli sorunların iyileştirilmesi adına değişik FDM tabanlı çözümler üretilmiştir. Çalışmaların bir kısmı ise soğuk çalışma problemleriyle tanınan dizel motorlar üzerine olmuştur.

Schatz (1992) çevresel şartların sıfırın altında olduğu zaman ısı bataryası kullanarak soğuk çalışmayı iyileştirme adına, kullanıcılar ve çevresel etkiler için bir çalışma yapmıştır. Tasarlamış olduğu 600 Wh ısı kapasitesine sahip ısı bataryası 170 mm çap, 370 mm uzunluk ve 10 kg ağırlığa sahiptir. Isı depolayıcı madde olarak yüksek enerji yoğunluğu, 78°C erime noktasına sahip, çevresel etkisi olarak kabul edilebilir düzeyde ve geri dönüşümü kolay olduğu için kimyasal formülü $Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O$ olan bir FDM malzemesi kullanılmıştır. Şekil 1.3’de bu tasarıma ait görüntü verilmiştir.



Şekil 1.3. Soğuk çalışma problemi için tasarlanan ısı bataryası (Schatz 1992)

Hazırlanan ısı bataryası motora monte edilmiş ve ilk seferde bir elektrikli pompa ile motorun soğutma suyu gönderilmiştir. Isı bataryasında radyatörden gelen su araç ilk çalıştığında ısınmaya başlarken diğer yandan ısı bataryası içerisinden geçerek ısısını içte yerleşmiş olan ısı depolama maddesine transfer ederek soğuma elde edilmesi düşünülmüştür. Bu şekilde araç çalışmaya devam ederken soğutucu akışkanın sıcaklığı faz değişen maddenin erime noktasına gelindiğinde faz değişimi yaşanırken bir yandan da gizli ısısını artırmaya devam etmiş olacaktır. Araç çalışmasını bitirdiğinde gece ya da hafta sonları olsun, önceden depolanan bu ısı ilk çalışmada motorun bloğuna ve silindir çevresine giderek ısınmayı çabucak gerçekleştirecektir. Şekil 1.4’de bu çevrimi gösteren şema verilmiştir.



Şekil 1.4. Motorun ısınma çevrimi

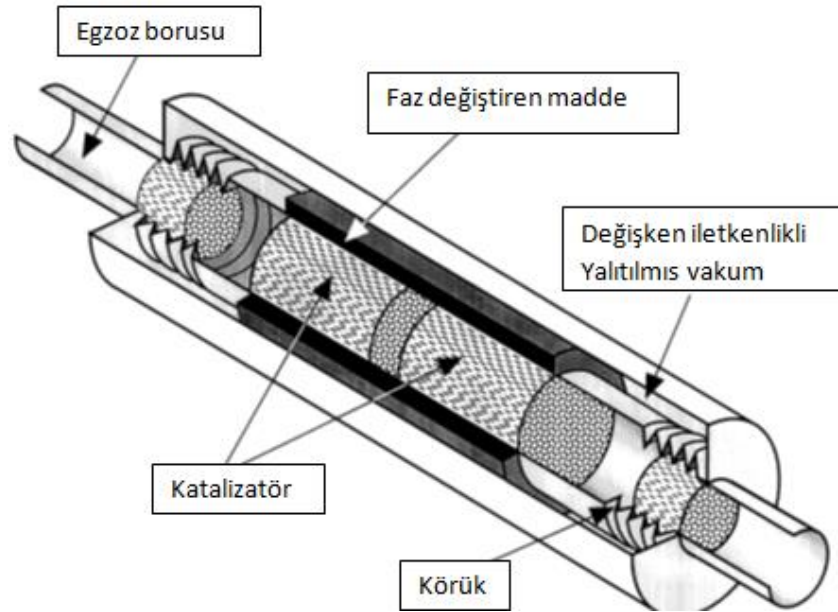
24°C’de olan standart testlerde modern arabaların HC ve CO emisyon değerlerini, sıfırın altında azalabilme yeteneği önemli bir başarı olduğunu dile getirmiş. Böylece muhtemeldir ki bugün ki arabalar tüm iklim şartlarında çok düşük emisyon değerleriyle çalışmaya devam edecekler. Araçla birlikte ısı bataryası çalıştığında, hidrokarbonların %40’ı, CO’nun ise %50 oranda azalmıştır. 60 sn adar bir ön ısıtma işlemiyle azalmaların %70 ile %80 arasında olduğu gözlenmiştir.

Korin *et al.* (1998) katalitik konvertörlerin içten yanmalı motorlarda hava kirliliğini azaltmada etkin bir yöntem olduğunu belirtmişler ancak bu etkinliğinin çalışma sıcaklığı üzerine çok güçlü etkisinin olduğunu ifade etmişlerdir. Çalışmaları kısa bir park süresince yüksek katalizör sıcaklığını sürdürmek için termal kapasitansından yararlanılmasına yönelik olmuştur. Bu sistem, özel tasarlanmış bir faz değiştirme materyali (FDM) içine gömülü bir soy metal içeren bir katalizörden oluşmaktadır. Normal motor çalışma şartları altında egzoz gazlarının termal enerjisinin bir kısmı FDM malzemenin içine depolanmış olup park esnasında FDM katılaşmaya devam ediyor ve katalizör sıcaklığı maksimum dönüşüm etkinliği için arzulanan sıcaklık aralığı içerisinde devam sürdürülmektedir. Metotlarının eşsiz özelliklerini ise, ısı konvertörü için özel bir enerji kaynağına ihtiyaç duyulmaması, işlemin basit, etkin ya da kontrol

araçları gerektirmemesidir. Çalışmada özellikleri 353°C erime sıcaklığı ve 251,5 kJ/kg gizli ısı füzyonu olan 3,8 kg FDM malzeme kullanılmış ve bu deneysel test sistemi ile elde edilen sonuçlar motor kapatma sonrasında yaklaşık 4 saat boyunca, HC için en yüksek katalizör sıcaklığı üzerinde mevcut olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar bu metotla büyük şehirlerde araçlardan kaynaklanan kirli gazları azaltmak için etkin bir yol olduğunu ortaya çıkarmıştır.

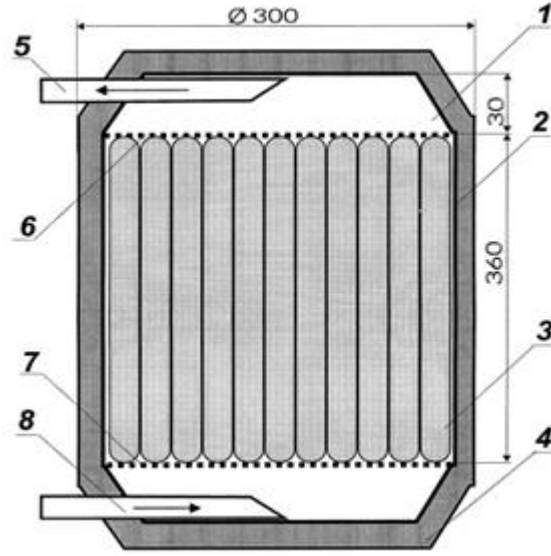
Vasiliev *et al.* (1999) tarafından içten yanmalı motorlarda soğuk çalışma problemi üzerine deneysel ve teorik bir çalışma için matematiksel model yaparak bir termal enerji depolama sistemi yapılmıştır. Otobüsün sağ boşluk kenarına yatay şekilde yerleştirilen bu termal sistem; silindirik örtü, FDM'li kapsüller ve ısı yalıtım ceketi olmak üzere 3 ana bölümden oluşmuştur. Bu sistem içersine 400 mm boyunda 109 kapsül yerleştirilmiştir ve faz değişim sıcaklığı 64°C olan 21,8 kg ağırlığında kimyasal formülü NaOH.H₂O olan bir FDM malzemesi kullanılmıştır. Depolanan enerji ise 7,5 MJ'dür. İlk önce FDM maddesinin 90°C'ye ısıtılmasının ardından sonra diğer sirkülasyon ile bu sefer sistemlerin içerisinde su dolaşımı sağlanarak belli aralıklarda sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Deneylerini farklı su giriş debilerinde ve farklı ortalama ısı gücü olarak denemişler ve bir otobüs motorunun ön ısıtması için geçen süreleri hesaplamışlardır.

Steven and Jhon (1999) bu konuyla ilgili olarak FDM malzemesini vakum yalıtımlı bir katalitik konvertör ile birleştirerek kullanmışlardır. Kullanmış oldukları bu sistem sayesinde motor 24 saat boyunca çalışma sıcaklığında tutulmuş ve dolayısıyla ilk çalışma esnasında konvertör sıcaklığını koruduğu için CO ve HC emisyon değerlerinde %60 ile %80 arasında değişen düşüşler elde etmişlerdir. Şekil 1.5'te kullanılan katalitik konvertör gösterilmiştir.



Şekil 1.5. Vakum yalıtımlı katalitik konvertör (Steven and Jhon 1999)

Vasiliev *et al.* (2000) bir ısı depolama sistemi ile otobüs motorunun ateşleme öncesi ön ısıtmasını yaparak matematiksel ve deneysel araştırmışlardır. Nümerik modelleme ile gerekli olan kütle ve boyut parametreleri belirlenmiştir. Bu sistem 350-350-500 mm boyutlarında olup 109 kapsül yerleştirilmiştir ve faz değışim sıcaklığı 64°C olan 65 kg ağırlığında olan NaOH.H₂O FDM maddesi kullanılmıştır. Dizayn ettikleri sistemde depolanan enerji 14 MJ olup depolanan enerjinin boşaltılırken ölçüm sürelerini 10 dk olarak yapmışlardır. Tüm bu çalışma 695 N marka bir şehir otobüsü üzerinde yapılmış ve 36 saat boyunca ki ısı emme ve atılmasının üzerine etkilerine bakılmıştır. Şekil 1.6'da kullanılan deneysel ısı depolama sistemine ait şematik gösterim verilmiştir.



Şekil 1.6. Deneysel ısı depolama sisteminin şematik gösterimi (Vasiliev *et al.* 2000)

Uğurlu (2008) soğuk çalıştırma problemine yönelik motorun ısıtılması gerektiğini belirtmiştir ve içten yanmalı bir motora uygulamak için faz değiştiren malzeme kullanarak bir ısı enerjisi depolama sistemi dizayn etmiş ve tasarlanan bu ısı depolama sistemini, motor soğutma suyu hattına uygulayarak çalışmasını yapmıştır. Bu çalışma ile motor çalışması durduktan sonra ve soğuma başladıktan itibaren 12 saat boyunca soğuk çalıştırma problemlerinin yüksek bir oranda azaldığını dile getirmiştir.

Gümüş (2009) yaptığı çalışmada içten yanmalı bir motorda özellikle soğuk çalışma da emisyon değerlerini incelemek adına katalitik konvertöre ön ısıtma işlemi yapmıştır. Yaklaşık 2000 kJ termal enerji depolamak için kimyasal formülü $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ olan bir FDM malzemesi kullanarak katalitik konvertörü mantolamış ve deneylerini 1 atm ve 2°C 'de gerçekleştirmiştir. 500's boyunca ön ısıtma ile motor sıcaklığının ortamla $17,4^\circ\text{C}$ 'ye kadar artabilmiş ve depolama periyodunda yaptığı sistemin verimini 12 saat bekleme süresi sonrasında %57,5 olarak görmüştür. Böylece ön ısıtma uygulanan motorda emisyon değerlerinin ilk 200 s de daha az olduğunu, CO ve HC emisyonlarının yaklaşık %64 ve %15 oranında azaldığını belirtmiştir. Belirtilene göre katalitik konvertöre sahip motorun normal şartlarda hava kirliliğini azaltmada çok etkin olduğunun ancak yaklaşık 200°C 'nin altında bu konvertörün etkinliğinin hızla azaldığı

görülmüştür. Bu çalışma ile içten yanmalı motorda FDM'in kullanılmasıyla soğuk çalışma emisyonlarının azalacağını dile getirmiştir.

Gümüş and Uğurlu (2011) çalışmalarında LPG'li araçlarda E&PR (Evaporatör ve Basınç Regülatörü) soğuk çalıştırma probleminin üstesinden gelmek için FDM kullanarak termal enerji depolayabilen E&PR sistemi dizayn etmişlerdir. FDM'li E&PR'nin termal davranışını rölanti çalışma şartlarında belirlemişler ve egzoz emisyonları (HC, CO) üzerine FDM ile çevrelenmiş E&PR kullanımının etkilerini incelemişlerdir. Çalışmaları gözlemlendiğinde, LPG güç motorlarının soğuk çalışma probleminin, FDM'li E&PR ile çözülebileceğini görmüşlerdir. FDM ile çevrelenmiş E&PR motorun 15 saat soğuma periyodu sonrası motorun doğrudan LPG ile çalıştırılabilir olduğunu ve LPG kullanımı esnasında üretilen HC ve CO emisyonlarının sırasıyla %17.32 ve %28.71 oranında azaldığını gözlemlemişlerdir.

1.3. Amaç

Dizel motorlarda soğuk çalıştırma problemi ve bu problemten kaynaklanan emisyon değişiklikleri üzerine çok çeşitli çalışmalar yapılmış ve çeşitli çözüm teknikleri geliştirilmiştir. Bunlar arasında yer alan başlıca teknikler şöyledir: Motor silindirlerine giren havayı ısıtma amaçlı emme havası ısıtıcıları, emme manifold yanma sistemleri, kızdırma bujileri, motorda kullanılan soğutucu akışkanların havayı ısıtması, ateşleme bujileri, egzoz gazlarının sirküle edilmesi, enjeksiyon sistemlerinin gelişmesi, emisyon için konvertör modelleri, içerisinde termal enerji depolayan faz değiştiren maddelerin bu konvertörlerde ve emme havası ısıtmasındaki gibi birçok yerde kullanılması gibi farklı teknikler yer alabilir. Bu çözümler sayesinde hem motorların soğuk çalışma problemleri azalmış ve dolayısı ile egzoz emisyon değerlerinin minimum seviyelere çekilmesine etki etmiştir. Fakat bazı çözümlerin kullanılması kendi içerisinde bazı dezavantajlarda getirmiştir. Bu sonucu göz önüne alarak hem dizel motorun soğuk şartlar altında çalışmasında ilk hareketi kolaylaştırması adına hem egzoz emisyonları için bir iyileştirme çabası olması için hem de diğer çözümler gibi ek bir maliyet, enerji veya güç tüketimine gerek kalmadan ve dahası çevre içinde herhangi bir zararlı dış

etkisi olmayan bir tür FDM maddesi kullanarak motor silindirlerine soğuk havanın gitmeden önce bir emme havası ısıtma işlemi uygulamak için bir ısı değiştiricisi sistemi tasarlayarak çalışma yapmak amaçlanmıştır.

Bu çalışmada farklı bir çözüm yolu için tedarik edilen bir FDM maddesi kullanarak silindirlere giden havanın ön ısıtma işlemini yapmak veya başka ifadeyle tanımlarsak, kullandığımız faz değişen maddenin öncesinde termal enerji depolayan bir termal enerji depolama sistemi haline dönüşmesi ve kendi içerisinde ısınıp bir süre koruyup, motorun ilk çalışmada bu ısının etkisinde kalan havayı doğrudan ilk marşla beraber kullanarak çalışmasını kolaylaştırmaktır. Temeldeki düşünce noktası olarak motorun soğuk şartlarda çalışması için gereken havanın kullanılmadan önce, içerisindeki mevcut ısınıp dışarı veren FDM maddesinden sağlamasıdır.

Böylece bu çalışmada, sıkıştırma ateşlemeli bir motora ilave edilen FDM maddesi içeren bir ısı değiştirici ile farklı sıcaklıklara ulaşan havanın kullanılması durumunda motor performansı ve egzoz emisyonları üzerine olan etkiler deneysel olarak incelenmiştir.

Isı değiştiricisine yerleştirilen FDM maddesinin sıcaklığı dışarıdan pompalan sıcak suyla sırasıyla 10°C'den 60°C'ye kadar 10°C'lik adımlarla artırılmış ve o sıcaklıklarda enerji depolaması sağlanmıştır. Daha sonra her sıcaklık değeri için motor 8 ile 10 dakika arası çalıştırılmış ve havanın dizayn edilen bu ısı değiştiricisinden geçerek motora ulaşması sağlanmıştır. Pratik uygulamada bu ısıtma işlemleri motorun kendi ısınmış radyatöründeki soğutma suyundan karşılanması düşünülmüştür ancak bizim çalışmamız soğukta ilk hareket olduğu için motorun ısınmadan öncesi şartlarda kullanılması gerekiyordu ve bunun yerine harici bir ısıtma sistemi kullanılmıştır. Bu arada egzoz emisyon değişimleri, çeşitli sıcaklık ölçümleri, yakıt tüketimi, silindir içi basınç her sıcaklıkta ayrı ayrı incelenmiştir.

1.4. Kapsam

Dizel motorlu araç modasının günümüzde giderek yaygınlaşması, kullanılan araçların sayısındaki artış, her gün yoğun trafikteki dur kalk ile birlikte buna ek olarak soğuk çalışma problemlerinin bu araçlardan kaynaklanan çevresel etkiler üzerine yoğunlaşmayı daha ön plana getirmiştir. Bu nedenle her geçen gün birçok araştırmacı bu konular üzerine yönelmektedir. Sonuç olarak dizel motorların soğuk çalışma problemi üzerine ve egzoz emisyonlarının geliştirilmesi adına bir çözüm yolu olarak düşündüğümüz bu çalışmada emme havası sıcaklığının motor performansına ve egzoz emisyonlarına olan etkilerini incelemiş bulunmaktayız.

2. KURAMSAL TEMELLER

Bir enerji formunu mekanik enerjiye çeviren makineye motor denir. Motorlar içten yanmalı ve dıştan yanmalı olmak üzere ikiye ayrılırlar. İçten yanmalı motorlarda genelde benzin ve diğer benzer yakıtların kullanıldığı buji ateşlemeli benzinli motorlar ve sıkıştırma ateşlemeli olarak çalışan dizel motorlar olmak üzere ikiye ayrılır.

Dizel motorlar daha özel bir tanımla, oksijen içeren bir gazın (genelde atmosferik hava kullanılır) sıkıştırılarak yüksek basınç ve sıcaklığa ulaşması ve silindir içine püskürtülen yakıtın bu sayede alev alması ve patlaması prensibi ile çalışan bir motordur. Bu yüzden benzinli motorlardan farklı olarak ateşleme için bujiye ve yakıt oksijen karışımını oluşturmak için karbüratöre ihtiyaç yoktur.

Dizel motor 1892’de Alman Mühendis Rudolf Diesel tarafından bulunmuş ve daha sonra 23 Şubat 1893’te patenti alınmıştır. Mucit öncelikle, Almanya’nın petrole bağımlılığını azaltmak için var olan kömür yataklarını kullanarak kömürle çalışan bir motor yapmayı amaçlamıştır. Ancak kömürün yanma sonunda ortaya çıkardığı kül büyük problem olmuştur. Böylece sonraki seferde farklı yakıtlar kullanmayı amaçlamıştır. Sonuç olarak Rudolf Diesel, motorun tanıtımını 1900 yılında Dünya Fuarı’nda yapmıştır.

Dizel motorun çalışma problemi şu şekilde açıklanabilir: Hava, dizel motorunun silindiri içerisine çekilir ve bir piston tarafından sıkıştırılır. Bu oran benzinli motorlara göre çok daha yüksektir. Hava sıcaklığı 500-700°C’a ulaştığında piston hareketinin en tepe noktasında, dizel yakıt yüksek basınçla enjektör memesinden geçerek yanma odasının içine püskürtülerek burada sıcak ve yüksek basınçlı hava ile karışır ve artan gazın sıcaklığından dolayı bu karışım hızla tutuşur ve yanmaya başlar. Tutuşmayla alev silindir içerisini hızlı bir şekilde taramaya başlar ve sıcaklıkla birlikte yüksek basınç değerleri oluşup pistonu geriye itmeye başlar. Silindir içerisinde açığa çıkan enerji, silindirin içerisindeki basıncı artırır ve pistonun AÖN’ya doğru itilmesi sağlanır ve

böylece güç elde edilmiş olur. Pistonun ÜÖN'ya doğru hareketiyle yanma ürünleri silindir dışına atılır ve diğer çevrimin gerçekleşmesi için gereken taze hava silindir içine alınır. Piston kolu vasıtasıyla oluşan bu itme krank miline iletilip, oradan da dönme momenti elde edilmiş olur.

Dizel motorlarda karbüratör ve buji yerine püskürtme pompası ve enjektörler mevcuttur. Hareketini bir dişli ile krank milinden alan püskürtme pompası, gerekli miktarda yakıtı, püskürtme sırasına göre silindirlerin enjektörlerine basar (Safgönül vd 2008).

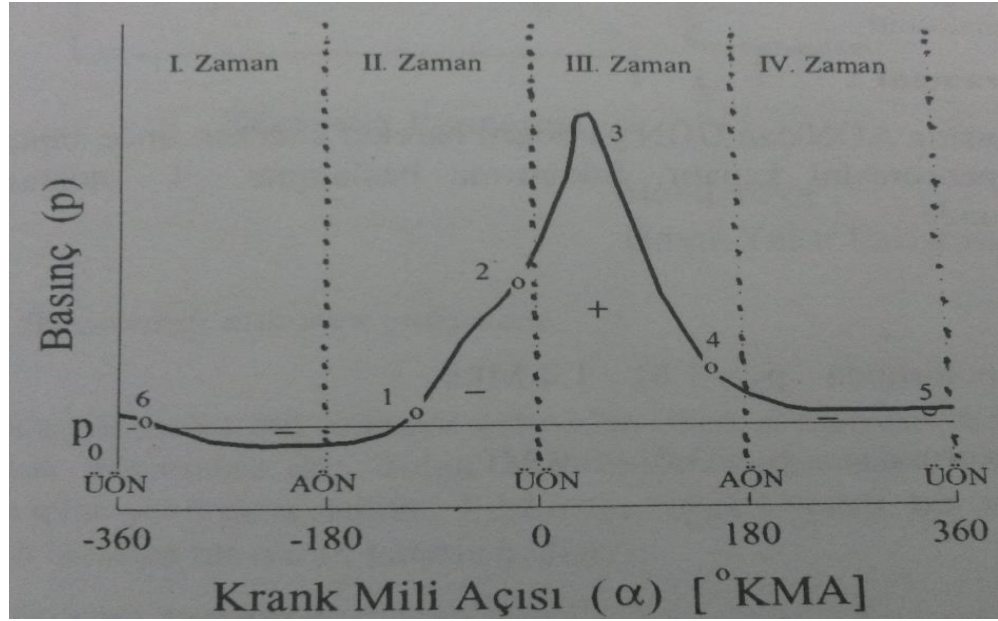
Sıkıştırma ateşlemeli motorlarda yanma süreci aşırı olarak komplekstir. Bu prosesteki detaylar yakıtın karakteristiği, motorun yanma odası dizaynı, yakıt enjeksiyon sistemi ve motorun çalışma şartlarıyla ilgilidir (Heywood 1988).

Dizel motorlarda yakıt enjeksiyonu, endirekt ve direkt olarak iki tiptir. Endirekt enjeksiyonda yakıt, dizel motorda yanma odası dışında, ön oda olarak adlandırılan yere verilir ve yanma başladığında yanma odasının içine yayılır. Direkt enjeksiyonda ise motordaki yanma odasının içine yakıt doğrudan püskürtülür. Endirekt enjeksiyon en küçük ebattaki motorlarda kullanılır (Heywood 1988).

Dört zamanlı sıkıştırma ateşlemeli motorlarda gaz akışının kontrolü için sübaplar kullanılmaktadır. Bu supaplar ile emme ve egzoz kanallarının gerekli zamanlarda açılıp ve kapatılması ile çevrimdeki zamanların değişmesini sağlar. Dört zamanlı bir motorda her çevrim aşağıdaki dört zamandan oluşur:

1. Emme Zamanı
2. Sıkıştırma Zamanı
3. Yanma ve Genişleme Zamanı
4. Egzoz Zamanı

Aşağıda Şekil 2.1'de dört zamanlı bir sıkıştırma ateşlemeli motorda meydana gelen çevrimde basıncın krank mili açısına göre değişimi görülmektedir.



Şekil 2.1. Motor çevrimi (Safgönül vd 2008)

Emme Zamanı: Piston ÜÖN’ya doğru hareketi sırasındaki emme zamanında silindirlere yalnızca hava emilmektedir. Bu sürede silindir içindeki basınç artar. Burada silindire daha fazla hava girmesi için emme sübabı üst ölü noktaya gelmeden açılır. Benzer şekilde emme sübabı kapanması da geç yapılır yani AÖN’den sonra olur. Supabın geç kapanmasına ise emme kapanma gecikmesi denilmektedir (Safgönül vd 2008). Emme zamanında alınan hava miktarı, emme ve egzoz sistemlerinin hidrolik dirençleri, taze dolgunun motorun sıcak yüzeylerine dokunması ve bir önceki çevrimden kalan artık gazlarla karışıp sıcaklığının yükselmesi, silindirde kalan yanmış gaz miktarı gibi unsurlara bağlıdır (Yardım 2012).

Sıkıştırma Zamanı: Silindir içine alınan temiz hava, pistonun AÖN’den ÜÖN’ya doğru hareketiyle birlikte sıkıştırılma zamanı başlar. Çalışma maddesinin ateşlenmesi ve yanma için uygun koşulları hazırlar. Böylece sıkışan taze dolgunun sıcaklık ve basıncı artar. Çevrimdeki yanma ürünlerinin sıcaklık farkı ile genişleme oranını yükseltir. Bu durum ısı verimi önemli ölçüde etkilemektedir. Dizel motorlarda sıkışan dolgu hava olduğundan, yakıtın tutuşması için sıcaklığın benzinliye göre 200-300°C daha yüksek olmalıdır (Yardım 2012). Sıkıştırma işlemi strok hacmi ve yanma odası hacmine göre

farklılık göstererek belli bir oran olan sıkıştırma oranına göre gerçekleşir. Sıkıştırma oranı strok hacmi (V_h) ve yanma odası hacmi (V_c) ile direk ilişkili olarak Eş. (1) ile hesaplanır;

$$\varepsilon = \frac{V_c + V_h}{V_c} \quad (1)$$

Sıkıştırma oranının artması hem yakıtın etkin kullanılmasını hem de termal verimin artmasına neden olur. Ancak bu oran belli bir noktaya kadar artırılabilir o da vuruntu noktasıdır. Vuruntu ise karışımların kontrolsüz bir şekilde yanması sonucu, basıncın lokal ve ani olarak yüksek değerlere çıktığı durumda oluşan bir durumdur. Motora zararı büyük olduğundan dolayı vuruntu istenmeyen bir durumdur. Bu durum uygun yakıtın kullanılması, uygun piston yüzeyleri ve uygun yanma odalarının tasarlanmasıyla iyileştirilebilir

Yanma ve Genişleme Zamanı: Bu işlemler sırasında yakıtın kimyasal enerjisi ısı enerjisine, ısı enerjisinin bir bölümü de hareket enerjisine dönüşür. Dizel motorlarda yanma, silindir içerisinde basıncı ve sıcaklığı yükselmiş olan havanın üzerine yakıt püskürtülerek gerçekleşir. Bu işlem piston üst ölü noktaya gelmeden önce yapılır (Yardım 2012). Bu erken püskürtme, “püskürtme avansı” olarak tanımlanmaktadır. Enjektörlerden püskürtülen yakıt, sıkıştırma zamanı sonunda kendi kendine ancak gecikmeli olarak tutuşmaktadır. Bu gecikmeye “tutuşma gecikmesi” denilmektedir (Safgönül vd 2008).

Egzoz zamanı: Bu zaman en az enerji kaybıyla genişleme zamanı sonunda silindir içerisinde kalan yanmış gazların basıncını en düşük değere indirmektedir. Modern motorlarda egzoz sübabı piston AÖN’ya gelmeden daha önce açılır. Bu durumda pistonun AÖN’dan ÜÖN’ya hareketi ile egzoz işlemine harcanan enerjiyi azaltarak, yanmış gazların silindirden süpürülmesini sağlar (Yardım 2012). Egzoz supabının erken açılmasına egzoz supabı açılma avansı denilmektedir. Egzoz supabı ÜÖN’dan biraz sonra kapanmaktadır. Bu arada egzoz ile emme supapları aynı zamanda açık kaldığı durum gözlenir ve bu olaya ise supap bindirmesi denilmektedir. Nihayetinde

içten yanmalı motorlarda sadece yanma ve genişleme zamanında faydalı iş elde edilebilmektedir (Safgönül vd 2008).

2.1. Dizel Motorların Soğuk Çalışma Problemi

Dizel motorlar, sıkıştırılan ve sıcaklığı artan hava üzerine mazotun enjektörler yardımıyla yüksek basınçta püskürtülerek, yakıtın sprey şeklinde hava içerisine dağılıp yanması ilkesine göre çalışır. Ancak düşük sıcaklıklarda ya da soğuk iklim bölgelerinde motor soğuk iken, yakıt ya yanmaz ya da çok yetersiz yanar. Böylece dizel motorlarının düşük sıcaklıklarda ilk harekete geçişte yaşanan sorunlar ortaya çıkmış olur.

Ortam havasının sıcaklığı ve motor silindir bloğunun sıcaklığı 0°C'ye yaklaştığında, sprey karakteristiğinde azalış, ateşleme zamanının gecikmesindeki artış, motor yağının viskozitesindeki artış ve batarya performansında düşüşler gözlenir (Çelik *et al.* 2013).

Özellikle 0°C altındaki yerlerde motorun çalıştırılması durumunda yağ viskozitesindeki artış, çok düşük devir sayılarına ve oldukça yüksek blow-by değerlerine sebep olur ve ek olarak zayıf hava hareketinden dolayı hava yakıt karışımı kötüleşir. Yanma odası ve enjektör dizaynı, yakıt-hava karışımı ve motor çalıştırılabilirliği üzerine güçlü bir etkiye sahiptir (Broatch *et al.* 2010).

Dizel motor soğuk çalışma problemleri uzun marş periyodu, duraksama ve beyaz duman emisyonlarını içermektedir. Dizel yakıtın yanma başlangıcı sıkıştırma oranı, sıkıştırma basıncı, yakıt özellikleri ve yakıt enjeksiyon karakteristiklerine bağlıdır. Marş boyunca silindirdeki hava sıcaklığı motor çalışmasında diğer modlardan daha düşüktür. Düşük sıkıştırma sıcaklığı ve basıncı genel olarak düşük ortam sıcaklığı ve daha önemlisi aşırı ısı kaybı ve düşük marş hızlarındaki kayıpların bir sebebidir. Bundan hareketle düşük sıkıştırma sıcaklığı ve basınç, dizel motorların zayıf çalışmasının bir sonucudur. Dizel motorlar soğukta ilk harekete geçişi sırasında aşağıdaki herhangi bir etkenden etkilenebilir (Liu *et al.* 2003):

- Yakıt özellikleri,
- Emme havası sıcaklık ve basıncı,
- Sıkıştırma oranı,
- Kaçaklar veya blow-by,
- Marş hızı,
- Yakıt enjeksiyonu,
- Yanma odası dizaynı.

Bu yüzden dizel motorlarının soğuk şartlar altında ilk hareketini kolaylaştırmak adına iki ön ısıtma sistemi kullanılmıştır. Bunlar genelde emme havası ısıtma sistemleri ile silindir içerisine giren havanın sıcaklığını artırmak veya günümüzde de tüm dizel araçlarda kullanılmakta olan kızdırma bujileri aracılığıyla yanma odasında sıcak noktanın oluşması ve yakıtın kendiliğinden tutuşmasını kolaylaştırması prensibine dayanır (Pastor *et al.* 2011).

Kızdırma bujileri ve emme havası ısıtma sistemleri

Kızdırma bujileri, dizel motorlarda havayı ısıtması ve motorun ilk hareket esnasında ortaya çıkan problemlerini azaltmak, egzoz emisyon değerlerini iyileştirmek ve kolay çalışmayı sağlamak adına (Çelik 2012) şu anda düşük sıcaklıkta, soğuk çalıştırma sırasında dizel motorlarda ateşlemeyi teşvik etmek için en istihdam çözümdür. Bu çözüm küçük ve orta ebatlı motorlarda en geniş yere sahiptir. Fakat bu bize normal yanma sürecine yanma odasında çıkıntı şeklinde duran ve yanma kararlılığına rahatsız edecek şekilde bir dezavantaj sunar (Pastor *et al.* 2011).

Emme havası ısıtıcıları soğuk şartlarda ilk çalışmayı desteklemektedirler. Emme manifoldu içerisine yerleştirilen bu sistemlerde genellikle elektrikli hava ısıtıcıları kullanılmaktadır. Bu sistemler; elektrikli ısıtıcı eleman, ısıtıcı rölesi, soğutucu sıcaklık sensörü, emme manifoldu hava sıcaklık sensörü, elektronik kontrol modülü ve gösterge lambası olmak üzere değişik elemanları içermektedirler. Bu elektronik kontrol modülü eğer motorun bulunduğu koşullar emme havasını ısıtmanın etkin olacağı aralıkta ise o

zaman ısıtıcıyı açmaktadır. Sistem bu ısıtma sürecini ilk çalışma öncesi, ilk çalışma esnası ve motor çalıştıktan sonraki belli bir süre boyunca sürdürebilir (Çelik 2012).

Bununla birlikte emme havası ısıtıcıları, soğukta ilk çalışmaya yardımcı olmasına ek olarak egzoz emisyonlarını iyileştirmek amacıyla da desteklenmektedirler. Ancak bu sistemlerin ilk çalışmada kolaylık sağlamasına ve egzoz emisyon karakteristiklerini iyileştirmesinin karşılık değişik dezavantajlara sahiptir. Temelde bu sistemler akü enerjisinden beslendikleri için düşük sıcaklıklarda akünün performansından düşüşlere neden olmakta ve böylece motor çalıştırılmak istendiğinde, motor krank milinin tahriki için marş motorunun aküye yüklenmesi ile başlıca bir problemi doğurmaktadır.

2.2. Dizel Motorlarda Egzoz Emisyonları ve Hava Kirliliği

İçten yanmalı motorlar kentsel hava kirliliğinde büyük bir faktördür. Bu motorların yanma ürünleri olan azot oksit (NO_x), karbon monoksit (CO), hidrokarbonlar (HC), partikül maddeler (PM) ve aldehitler hava kirliliğinin önemli bir kaynağıdır. İçten yanmalı motorlardan kaynaklı havadaki (NO_x), CO ve HC ürünleri kirliliklerinin neredeyse yarısını oluşturmaktadır. Bu kirlilikler sağlık ve çevre için zararlı etkilere yol açmaktadır (Ferguson and Kirkpatrick 2001).

20. yüzyılın ortalarına kadar dünyada sıkıştırma ateşlemeli motorların sayısı yeterince az olup, onlardan salınan kirlilik için tolerans sağlanmış ve güneş ışınlarının yardımıyla nispeten hava temiz kalabilmiştir. Dünya'daki nüfus arttıkça, güç santralleri, fabrikalar ve sürekli artan otomobiller uzun süre kabul edilemeyecek aşırı bir kirliliğe neden olmuşlardır. 1950'ler boyunca hava kirliliği problemi otomobil ve insan nüfusundaki artışla birlikte artmıştır. Otomobillerin bu probleme en büyük katkı sağlayıcısı olmasının anlaşılmasıyla beraber 1960'larda emisyon standartları Kaliforniya' da yürürlüğe girmesi için başlatıldı. Daha sonraki yıllarda bu standartların uyguladığı ülkeler artmaya devam etmiştir. Bu süreçle beraber motorlarda yakıt etkinliği ve egzoz iyileştirmeleriyle beraber 1970 ve 1980 yıllarında HC, CO ve NO_x değerlerinde %95 kadar azalma meydana gelmiştir. 1980 lerde kirliliğin başında yer alan kurşun miktarı

kademeli olarak azaltıldı ve daha sonra emisyonlarda olumlu yönde iyileşmeler başladı. Ancak hava kirliliği küresel bir problem olmasına rağmen dünyadaki bazı bölgelerde hala daha emisyon standartları ve yasalar yer almamaktadır (Pulkrabek 2003).

2.2.1. Hidrokarbonlar (HC)

Dizel motorlardaki hidrokarbonlar temel olarak enjektöründeki kalan yakıttan yani enjeksiyon sırasında en sonunda geç olarak dışarı yayılan yakıttan, yakıtın hava içerisine dağılmasının kötü olması, duvar yarıkları boyunca kalan yakıttan ve hava içerisine spreyi yapılan yakıtın zayıf olmasıyla yanmaması gibi değişik sebeplerden dolayı ortaya çıkmaktadır. Ayrıca karakteristik zaman eküvalans oranının güçlü bir fonksiyondur ve yakıtla havanın stokiyometrik oranlarına minimum yakındır. Ancak karakteristik zaman sınırlı olduğundan bir hava yakıt bileşikler stokiyometrik oranlarda karıştırılabilir ve daha sonra oto-ateşleme oluşumu öncesi daha fazla havayla seyreltilebilir. Sonuç olarak zayıf eküvalans oranlarının sınırları vardır ve oto-ateşleme oluşumu zamanında bölgesel olarak yakıt hava karışımları zayıf alevlenme limitinden daha azdır. Böylece bu lokal yakıt karışımı yanmaz ve HC emisyon değerleri artar. Bununla birlikte direkt enjeksiyonlu dizel motorlar, indirekt enjeksiyonlu motorlara göre daha fazla HC salınımı yapmaktadır Diğer bir nokta olarak direkt enjeksiyonlu motorda zayıf yükte HC değerleri kötüdür (Ferguson and Kirkpatrick 2001).

Yanma odası geometrisi ve motor çalışma parametreleri de ayrıca HC bileşenini etkilemektedir. Bu emisyon ürünü atmosfere girdiği zaman hem kokuya neden olur hem de rahatsız edici bir etkiyle beraber kanserojen özelliğe sahip olur CH_4 hariç bütün bileşenler atmosferik gazlarla tepkime vermektedir. Dizel motorlar bir benzinli motorun üretmiş olduğu HC emisyonunun sadece 5'te 1'i kadarını üretir. Dizel yakıtın bileşenleri ortalamada benzine göre yüksek moleküler ağırlığa sahiptir. Bu durum daha yüksek kaynama ve yoğunlaşma sıcaklıkları ile sonuçlanır. Bu durum bazı HC partiküllerinin yanma boyunca üretilen katı karbon kurumları üzerine yoğunlaşmasına izin vermektedir. (Pulkrabek 2003)

2.2.2. Karbonmonoksit (CO)

Renksiz, kokusuz ve zehirli bir gaz olan karbonmonoksit gazı motorun yakıt bakımından zengin oranda çalıştırılmasıyla üretilir. Bu süreçte yeterince oksijen olmadığı için tüm karbon atomları karbondioksit (CO_2) dönüşmemektedir. Bir başka durum olarak yakıttaki bir bölümün yanmaması üzerine bazı karbonlar yine CO olarak son halini alırlar. Genelde bir buji ateşlemeli motorun egzoz gazında yaklaşık %0.2 ile %5 arasında CO yer almaktadır. Bu durum hem istenmeyen CO değerini hem de kayıp kimyasal enerjiyi de temsil etmektedir. CO gazının yanma denklemi Eş. (1) ile verilmiştir.

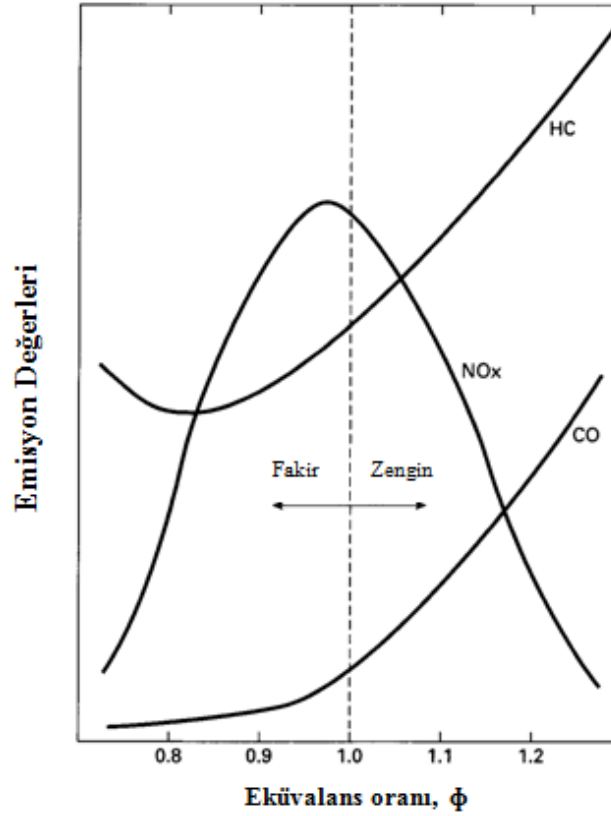


Maksimum CO üretimi bir motorun yük altında ilerlemesi ya da çalışması gibi zengin yanmanın devam ettiği durumlarda oluşur. Hava yakıt karışımının stokiyometrik veya fakir olduğu zaman bile motordan bir miktar CO gazı üretimi olacaktır. Sıkıştırma ateşlemeli motorlar ise genel olarak çok daha düşük CO emisyon değerine sahiptir (Pulkrabek 2003).

CO emisyonunu etkileyen en önemli motor parametresi hava yakıt oranıdır. Diğer bütün etkenler ikinci sırayı almaktadır. Elde edilen çalışma sonuçlarında görülmektedir ki stokiyometrik şartlara yakinken CO emisyonları eküvalans oranının yüksek derecede non-lineer fonksiyonudur. Bu şartlar altında çok silindirli motorlarda her biri için aynı hava yakıt oranını vermenin önemi başta gelir. Bir motorun ortalama CO emisyonu uygun olamayabilir ortalama bir eküvalans oranına fakat bir eküvalans oranı ortalamadan daha yüksek olabilir ve gerekenden daha fazla CO üretimi olur.

CO emisyonlarını minimize etmenin anahtar yolu, motorun zengin çalışma zamanlarını minimum seviyede tutulmasıdır. Diğer yandan dizel motorlar düşük yüklü çalıştığında CO emisyonları düşük ve genel olarak önemli bir problem değildir. Aynı şekilde direkt

enjeksiyonlu dizel motorlar indirekt enjeksiyonlu dizel motorlara göre daha fazla CO emisyon salımı yaparlar (Ferguson and Kirkpatrick 2001).



Şekil 2.2. Eküvalans oranıyla egzoz emisyonlarının değişimi (Pulkrabek 2003)

2.2.3. Nitrojen oksitler (NO_x)

NO_x emisyonları yanma prosesi boyunca yanma odasında baştan sona oluşmaktadır. NO_x sıcaklığa bağlıdır ve bu yüzden NO_x emisyonları motor yüküyle oransal bir ilişkisi olup NO_x emisyonları motor çalışması ve ısınması boyunca izafi olarak daha düşüktür (Ferguson and Kirkpatrick 2001).

Bir motorun egzoz gazında nitrojen oksitleri değeri 2000 ppm değerine kadar ulaşabilir. Bunların çoğu ise nitrojen oksit olup küçük bir miktarı da NO_2 gazıdır. Geriye kalanlar da diğer NO_x kombinasyonlarını içermektedir. NO_x istenmeyen bir emisyon ve izin

verilen miktarlar için düzenlemeler giderek daha sıkılaşmaktadır. Salınan NO_x atmosferde ozon tabakasında reaksiyon vermekte ve fotokimyasal dumanların nedenlerinin en büyük olanlarından birisidir. Bu bileşen genellikle havadaki nitrojenden oluşmaktadır. NO oluşumu için çok sayıda reaksiyonlar vardır. Tüm bunlar muhtemel olarak yanma süreci boyunca ve hemen sonrasında oluşmaktadır. Bazı oluşum reaksiyonları aşağıda Eş. (3), Eş. (4), Eş. (5)'de verilmiştir.



Atmosferik nitrojen ikili atomik molekül olarak düşük sıcaklıkta var olmaktadır ve sadece çok küçük miktarda nitrojen oksitleri bulunur. Ancak çok yüksek sıcaklıklarda bir motorun yanma odasında bazı diatomik nitrojen (N₂) kırılarak tek atomlu nitrojen oluşur.

Sıcaklığa ek olarak NO_x formasyonu basınca, hava yakıt oranına, silindir içerisinde yanma zamanına, anlık olmayan kimyasal reaksiyonlara bağlıdır. Yanma odalarında hızlı yanma yapan modern motorlarda NO_x değerlerinin azaltılmış ve zaman ilişkisiyle destekleme yapılmıştır. Üretilen NO_x miktarı ayrıca yanma odası içerisindeki konumuna da bağlıdır. En yüksek konsantrasyon ateşleme bujisinin etrafında olmakta ve yine en yüksek sıcaklığın olduğu bölgedir. Bölünmüş yanma odalı ve dolaylı enjeksiyonlu CI motorlar, NO_x değerlerini daha yüksek düzeyde üretmek eğilimindedir (Pulkrabek 2003).

2.2.4. Partikül maddeler (PM)

Sıkıştırma ateşlemeli (CI) motorların egzozları katı karbon kurum partikülleri içermektedir. Bu oluşum yanma boyunca silindir içerisinde zengin yakıt bölgelerinde meydana gelmektedir. Bunlar egzoz dumanı olarak görülür ve arzulanmayan bir kirlilik kokusudur. Partikül emisyonlarının maksimum yoğunluğu motor yük altında çalışmasıyla oluşmaktadır. Bu şartta maksimum gücü desteklemek için maksimum yakıt enjekte edilir.

Kurum partikülleri katı karbon kürelerin kümelenmişidir. Bu kürelerin çapları 10 nm den 80 nm kadar olabilmektedir. Küreler HC ve yüzeyde emilen diğer bileşenlerin izleri ile katı karbondur. Tek bir kurum partikül 4000 karbon küresi kadar içerir. Karbon küreleri yanma odasında zengin yakıt bölgelerinde yani bütün karbonların CO₂'ye dönüşmesi için yeterince oksijen desteğinin olmadığı yerde üretilmektedir. Bir motor içerisinde üretilen karbon partiküllerinin %90'dan fazlası aslında tüketilmiştir. Eğer CI motorların toplamda stokiometrik hava yakıt karışımı ile çalışması isteniyorsa bile bunun yerine zayıf karışım olarak devam edilmesi ile egzozdaki partikül madde emisyonları daha fazla kabul edilebilir değerlerde olacaktır. Kurumdaki karbonun yaklaşık %25 kadarı yağlama yağı bileşenlerinin buharlaşması ve daha sonra yanma boyunca reaksiyon vermesinden kaynaklanmaktadır. Geri kalanı ise yakıttan gelir ve bu miktar yakıtın %0,2 ile %0,5'i arasındadır. CI motorların yüksek sıkıştırma oranlarından dolayı güç stroku boyunca büyük bir patlama oluşur ve silindirlerdeki gazlar nispeten düşük bir sıcaklık için genişlemeyle birlikte soğutulur. Bu nedenler karbon kurum partiküllerinin yüzeyinde yağlama yağını yoğunlaşması ve yakıttaki yüksek kaynama noktalı bileşiklerin kalmasındandır.

Partikül üretimi motor dizaynı ve çalışma şartlarını kontrolü ile azaltılabilir fakat bu sık şekilde diğer aksi sonuçları yaratacaktır. Yanma süresi yanma odası tasarım ve zamanlama kontrolü ile uzatılırsa egzozdaki partikül miktarları da azaltılabilir. Başlangıçta üretilen kurum partikülleri oksijenle karışması ve yanmanın CO₂ çevirmek için daha fazla zamana sahip olmuş olacak. Ancak uzun bir yanma zamanı yüksek bir

silindir sıcaklığı ve daha çok NO_x üretimi anlamına gelmektedir. Egzoz gazının sirkülasyonu ile seyreltme NO_x emisyonlarını azaltır, ancak parçacık ve HC emisyonunu yükseltir. Yüksek enjeksiyon basıncı HC ve partikül emisyonunu azaltan ince bir damlacık boyutunu verir ancak silindir sıcaklığı ve NO_x emisyonlarını artırır. Motor yönetim sistemleri NO_x, HC, CO ve PM emisyonlarını ateşleme zamanı kontrolü, enjeksiyon basıncı, enjeksiyon zamanlaması, valf zamanı gibi kontrollerle minimize etmek için programlanmıştır (Pulkrabek 2003).

2.2.5. Sülfür

Çoğu yakıt CI motorlar içerisinde kullanılır ve bunlarda içinde küçük miktarda sülfür içermektedir. Egzoz gazlarıyla beraber ortaya çıkan bu emisyon ürünüde atmosferde asit yağmurlarına katkı sağlar. Kurşunsuz benzinde genelde yaklaşık 150-600 ppm sülfür içermekte diğer yandan bazı dizel yakıtlar ise ağırlıkla 5000 ppm kadar içermektedir. Yüksek sıcaklıkta sülfür hidrojen ile birleşir ve H₂S ve SO₂ formuna dönüşür. Bu dönüşümler Eş. (6) ve (7) ile verilmiştir (Pulkrabek 2003).



2.3. Faz Değiştiren Maddeler (FDM)

Faz değiştiren maddeler (FDM) kavramını “Durum Değişimindeki Madde” olarak da ifade edebiliriz. Maddenin durum değişimi, örneğin katıdan sıvıya, ya da sıvıdan gaz durumuna geçmesidir. Bu süreçte madde belirli miktarda ısıyı alarak faz değişimine uğrar. Maddenin faz değiştirmesine neden olan ısıya ise gizli ısı denir. Bu durumu tersi olarak düşündüğümüzde, gaz durumundan sıvı veya sıvı durumdan katı durumuna geçtiğinde ise, daha önceden depolanan enerji yine sıcaklıkta önem arz eden bir değişiklik olmadan uzun zamanda aldığı enerjiye dışarıya vermektedir (Büyükbıçakcı 2006).

Faz değiştiren maddeler gizli ısı depolayan maddelerdir. Bilinen duyulur depolayıcı maddeler aksine FDM'ler ısıyı yaklaşık sabit sıcaklıklarda hem emerler hem de serbest bırakırlar. FDM'ler duyulur ısı depolayıcısı olan su, kaya, taş gibi maddelerden birim hacimde 5 ile 14 kat daha fazla ısı depolar. Gerekli herhangi bir ısı füzyonu aralığında eriyen çok sayıda FDM maddesi bilinmektedir. Ancak, çalışılan iş için gizli ısı depolama malzemesi olarak bu malzemeler, termodinamik, kinetik ve kimyasal gibi bazı arzu edilen özellikleri sergilemek zorundadır. Ayrıca ekonomik değerlendirmeler ve bu malzemelerin kolay erişebilirliği de göz önünde tutulmalıdır (Sharma *et al.* 2009).

FDM'deki bu gizli ısı özelliği termal uygulama için en favori özelliğidir. Erime noktasına ulaştığında erime tam olması için depolama maddesinin sıcaklığı sürekli devam eder. İşte bu faz değişim süreci sistemin sıcaklığı artmazken ısının büyük bir miktarının emilmesini mümkün kılar. Bir FDM maddesinin gizli ısı özelliği doğal bir prosestir ve sisteme ekstra bir enerji girişine gerek duymadan kolayca var olan bir sistem içerisinde uygulanabilir (Anisur *et al.* 2013).

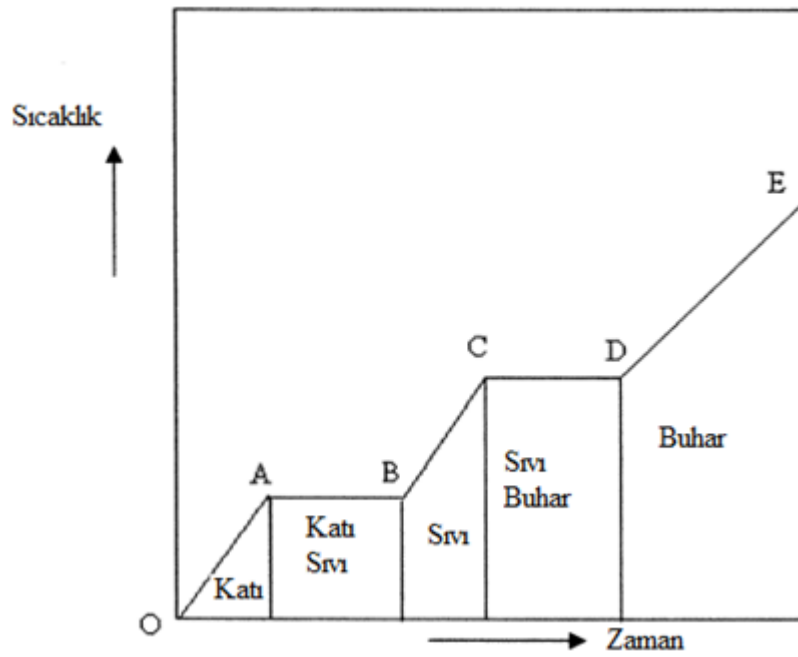
2.3.1. Faz değiştiren maddelerin özellikleri

Faz değiştiren maddelerin kullanımıyla termal enerji depolamada yüksek termal iletkenlik ve geniş bir gizli ısıya sahip olmak gerekir ve bu maddelerin geniş bir erime sıcaklık bandına sahip olma özelliği de önem arz etmektedir. Bu maddeler korozyon etkisi olmayan, kararlı bir kimyasal yapıya sahip ve düşük masraflı olmalıdır. Son kırk yıl boyunca çalışılan maddeler hidrat tuzlar, parafin mumları, yağ asitleri ve organik ve organik olmayan bileşenlerin ötektikleridir. Uygulamalara bağlı olarak FDM'ler öncelikli olarak erime sıcaklığına bağlı olarak seçilmelidir. Bu maddelerden erime sıcaklığı 15°C'nin altında olanlar klima uygulamalarında ve erime sıcaklığı 90°C'nin üzerinde olanlar ise soğutmada ısı emme amaçlı kullanılır. Bu iki sıcaklık aralığındaki maddeler diğer ısı yüklemelerinde kullanılmaktadır (Farid *et al.* 2004).

Termal ısı depolama temelde bir maddenin faz değişimine uğradığı zaman ısıyı emmesi ya da serbest bırakmasına dayanmaktadır. Buna göre Sharma and Sagara (2005) FDM'li

bir termal ısı depolama sisteminde depolama kapasitesi aşağıdaki bağıntılarla ifade edilir. Şekil 2.3’de hal değişim evrelerine ait gösterim verilmiştir.

$$Q = m \cdot a_m \cdot \Delta h_m + \int_i^m m \cdot C_p \cdot dT + \int_m^f m \cdot C_p \cdot dT \quad (8)$$



Şekil 2.3. Hal değişim grafiği

Gizli ısı depolama sistemleri duyulur ısı depolama sistemiyle kıyaslandığında bazı faydalara sahiptir. En önemlisi olarak birim kütle ve birim hacim başına daha yüksek enerji yoğunluğudur. Termal ısı depolama teknikleri arasında, gizli ısı depolaması, onun yüksek enerji depolama yoğunluğu yeteneği ve faz değiştiren maddenin sıcaklığının kapsayan sabit sıcaklıkta depolama karakteristiğini özellikle çekici kılmaktadır.

Yalnız duyulur ısı depolayan maddeler ve faz değiştiren maddeler karşılaştırıldığında FDM’ler önemli seviyede küçük hacimlerde daha fazla bir ısı depolama kapasitesine sahiptir. Ayrıca ısıyı aldığı veya serbest bıraktığı sıcaklık aralığı çok dar bir bantta olduğundan ısıнын büyük kısmı asıl istenen sıcaklıkta kullanılabilir olması açısından da büyük bir avantaja sahiptir (Uğurlu 2008).

2.3.1.a. Termal özellikler

- Uygun faz geçiş sıcaklığı
- Yüksek gizli ısı geçişi
- Yüksek özgül ısı
- İyi ısı transferi
- Yüksek termal iletkenlik
- Arzu edilen çalışma sıcaklığı aralığında erime sıcaklığının olması
- Uyumlu ergime (Abhat 1983; Sharma and Sagara 2005; Uğurlu 2008; Sharma *et al.* 2009)

Özellikle seçilen bir FDM için, ısıtma ya da soğutma çalışma sıcaklığının, FDM geçiş sıcaklığıyla uyumlu olmalıdır. Isı depolamanın fiziksel boyutunu minimize etmek için özelliklerde hacimsel tabanda olmak üzere gizli ısı olabildiğince yüksek olmalıdır. Yüksek termal iletkenlik, gizli ısıyı depolamaya ya da boşaltmaya yardımcı olmaktadır. Ayrıca oldukça küçük sıcaklık değişimleriyle çok miktarda ısı depolaması için yüksek depolama yoğunluğuna sahip olmalıdır (Sharma and Sagara 2005; Sharma *et al.* 2009). Yüksek faz dönüşüm ısı FDM’de aranan en önemli özelliklerden biridir. Örneğin bazı yüksek hidratlaşma derecesinde olan tuz çeşitleri bazen büyük füzyon ısısına sahiptir ancak bu tuz çeşitleri çoğunlukla ya düzensiz ya da yarı düzenli erime davranışı sergileyebilirler. Bu erimedeki düzensizlik tuz hidratların kristallenme esnasında meydana gelir. Böylece faz ayrımı oluşması ile mevcut kapasitede bir azalış görülür. Bu yüzden böyle durumlar için erime sırasında esnasındaki taşınım ile oluşan ısı transferini önlemek için başka katkı maddeleri ilave edilir. Bu bilgiler ışığında bir FDM düşük füzyon ısısına sahip olsa bile diğer maddelere göre düzenli bir erime özelliğine sahipse kullanımda tercih edilebilir (Büyükbıçakcı 2006).

2.3.1.b. Fiziksel özellikler

- Uygun faz dengesi

- Yüksek yoğunluk
- Faz geçişi sırasında küçük hacim değişimi
- Düşük buhar basıncı (Abhat 1983; Sharma and Sagara 2005; Uğurlu 2008; Sharma *et al.* 2009)

Donma ve erime boyunca faz stabilitesi, depolama boyutunun daha küçük olması için yüksek yoğunluk önemlidir. Faz dönüşümündeki küçük hacim değişimleri ve çalışma sıcaklığındaki küçük buhar basıncı kapsama problemleri azaltır. Gizli ısı ve duyulur ısı depolama arasında kıyas yapıldığında, gizli ısı depolama için depolama yoğunluğu genellikle 5-10 kat daha fazla bir değere ulaştığı görülebilir (Sharma *et al.* 2009). Yoğunluğun yüksekliği istenmesine rağmen yoğunluk çoğu kez füzyon ısısının azalma etkisine karşılık artış gösterir. Diğer bir şekilde ifade etmek gerekirse örneğin bir tuz hidrat iyonu için atom ağırlığı artarsa yoğunlukta artar. Diğer yandan birim kütle başına düşen füzyon ısısı azalır. Sonuç olarak bir tuzun hidratlaşma derecesi artarken yoğunluğu düşer, fakat yüksek derecede su içerdiği için füzyon ısısı da artmış olur (Büyükbıçakcı 2006).

2.3.1.c. Kinetik özellikler

- Aşırı soğuma (sıvı fazda aşırı soğumayı önlemek için yüksek çekirdeklenme hızı)
 - Yeterli kristalleşme oranı ya da yüksek oranlı kristal büyüme
- (Abhat 1983; Sharma and Sagara 2005; Uğurlu 2008; Sharma *et al.* 2009)

Aşırı soğuma FDM'in gelişmesinde özellikle tuz hidratlar için bazı zahmetlere neden olur. Böylece birkaç dereceden daha fazla soğuma depolaması için ısıyı daha fazla çekmiş olacaktır (Sharma *et al.* 2009). Burada aşırı soğuma bir diğer karşılaşılan problemdir. Bu sorun etkin bir çekirdek oluşumu ile halledilebilir. Sistem çalışma sıcaklığının 5-10°C üzerinde eriyen bir FDM'in depolayıcı olarak seçimi önem arz etmeyen bir durumdur. Bu seçimde esas olan minimum ısı kayıpları elde etmek ve ısı transferinin iyileştirilmesi açısından yeterli sıcaklık farkı sağlanması gerekir. Depodan uygun şekilde ısı çıkışı ile birkaç dereceyi aşan bir aşırı soğuma halinde bu kayıplar

önlenebilir. Aşırı soğuma olmaması halinde bile, doğal olarak gerçekleşen yavaş kristal büyüme hızı, ısı çekilme hızını istenmeyen bir değere kadar azaltabilir (Büyükbıçakcı 2006).

2.3.1.d. Kimyasal özellikler

- Uzun süre kimyasal kararlılık
- Bozunmanın olmaması (Çok fazla erime ve donma döngüsünden sonra)
- Kaplama ya da saklama malzemeleriyle uygunluk
- Erime ve donma döngüsü sonrası bütünüyle geri dönüşümlü olması
- Toksik ekisinin ya da zehirli etkinin, patlayıcı özelliği olmayan ve yanma tehlikesinin olmaması (Abhat 1983; Sharma and Sagara 2005; Uğurlu 2008; Sharma *et al.* 2009)

FDM diğer malzemeler ile kimyasal ayrışmaya ya da uyumsuzluk ve su kaybı ile bozulmalarda olabilir. Güvenlik açısından FDM’ler toksik etkisi, alevlenme ve patlama gibi özellikleri olmamalıdır (Sharma *et al.* 2009). Bir FDM’de yarı kararlı veya tam kararlı erime ve katılaşma özelliğine bağlı olarak depolama kapasitesinde meydana gelecek herhangi bir azalma önemli sorunlar çıkarabilir. Bunlara ek olarak, oksidasyon, hidroliz, ısıl ayrışma ve diğer reaksiyonlar başka özellikler bakımından kabul edilen bir FDM’in ısı depolayıcı madde olarak kullanılmasında engel teşkil edebilir. Ayrıca FDM, kendisini içinde depolamasını sağlayan diğer araç ya da malzemelerle herhangi bir kimyasal reaksiyona girmemelidir (Büyükbıçakcı 2006).

2.3.1.e. Ekonomik özellikler

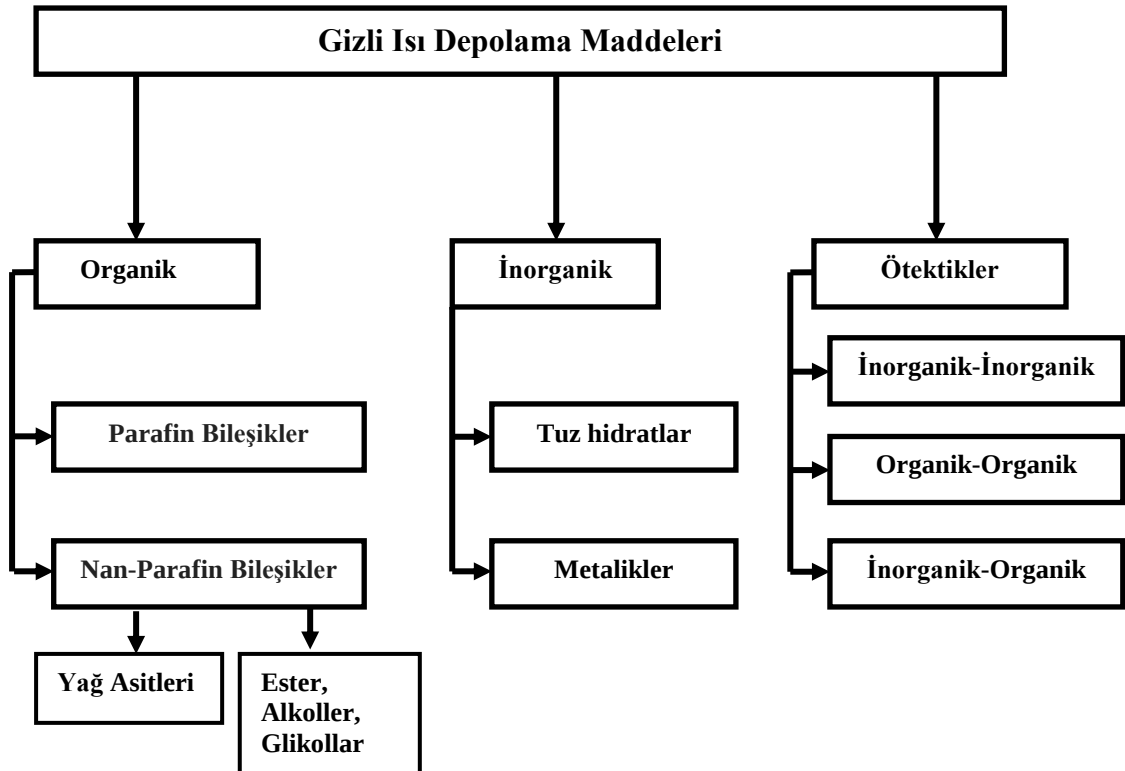
- Bol
- Elde edilebilir, uygulanabilir
- Masraf etkisi - Ucuzluk (Abhat 1983; Sharma and Sagara 2005; Sharma *et al.* 2009)

Düşük masraflı olması ve geniş ölçekte elde edilebilmesi gibi faktörler FDM'lerin seçiminden en başta gelen özellikleridir (Sharma *et al.* 2009).

2.3.2. Faz değıştiren maddelerin sınıflandırılması

Genel olarak erime sıcaklığı ve gizli ısı füzyonu tespit edilmesi açısından faz değıştiren maddeler organik, inorganik ve ötektik gibi başlıklar altında çok fazla sayıya sahiptirler. Ancak çalışma aralığında erime noktası hariç FDM'lerin büyük çoğunluğu tartışıldığı gibi depolama amaçlı olarak gerekli kriterler bakımından memnun etmezler. FDM'lerin ideal depolama için gerekli olan özelliklerini tek başına bir madde taşımayabilir (Sharma *et al.* 2009). Çizelge 2.1'de gizli ısı depolama maddelerini temsil eden bir sınıflandırma yer almaktadır.

Çizelge 2.1. Faz değıştiren maddelerin sınıflandırılması (Sharma *et al.* 2009; Rathod and Banerjee 2013)



Genellikle inorganik bileşenler, organik bileşiklere göre iki kat kadar bir hacimsel gizli ısı depolama kapasitesine sahiptir. Maddelerin bu çok farklı termal ve kimyasal davranışları, FDM kullanılarak termal enerji depolama sisteminin dizaynını etkileyen her bir grup altının özellikleridir (Sharma *et al.* 2009).

2.3.2.a. Organik faz değıştiren maddeler

Organik maddeler daha çok parafin ve parafin olmayan olarak tanımlanırlar. Organik maddeler uyumlu ergime, faz ayrımı olmaksızın tekrarlanabilir donma ve füzyonun kendi gizli ısı bozulması sonucunu içerir. Ayrıca organik maddelerin öz çekirdeklenmesi, aşırı soğutmanın olmadığı ya da az olduğu ve genellikle olmayan koroziyifliği ile birlikte kristalize olması anlamını taşır (Sharma *et al.* 2009).

0-120°C çalışma sıcaklığı aralığı içerisinde, seçilen FDM organik ve inorganik bileşenler ile onların ötektik grubu içerisinde dahil edilmiştir. Parafin ve parafin olmayan FDM'ler organik bileşenler ailesine mensuptur. Organik bileşikler hacimsel gizli ısı depolama kapasitesi olarak inorganik maddelere göre dezavantaja sahiptir. Hacimsel gereksinimlerle ilgili dezavantajlara rağmen, organik maddeler inorganik maddelere kıyasla onların sahip olduğu çeşitli arzulanan özelliklerinden dolayı önemli ısı depolama maddeleri olarak hizmet etmektedirler. Bu avantajlardan bazıları erime uyumluluğu yeteneğinin olması, onların öz çekirdeklenme özelliği ve bilinen inşa malzemeleriyle bağdaşması gibi özellikleri sıralanabilir. Böylesine kullanışlı ısı depolama maddelerinin detayları sırasıyla başlıklar altında verilmiştir (Abhat 1983).

Parafinler: Bu tür maddeler normalde oda sıcaklığında yapışkan bir kıvama sahip olan maddeler olarak tanımlanır. Kimyasal olarak, parafin mumlar temelde küçük bir dallanma miktarıyla birlikte 2 metil grupları gibi zincirin sonuna yakın düz zincirli hidrokarbonlar oluşur. Parafinler kendi içerisinde büyük bir bileşeni olan alkanları içermektedir. Normal parafinler C_nH_{2n+2} kimyasal formülüne sahip olup ve normal alkanların parafin mumlardaki içeriği yüzde 75'i geçiyor ve yüzde 100'e kadar ulaşabilir. Parafinler çok benzer özellikleriyle birlikte doymuş hidrokarbon ailesinden

biridir. Parafinler C_5 ve C_{15} arasında sıvı ve geri kalanı katı mumdur. Parafin mumlar en çok kullanılan ticari organik ısı depolama malzemeleridir. Bu maddeler genel olarak erime sıcaklığı aralığı 23 ile 67°C arasında olan düz zincirli hidrokarbonlar içermektedir. Parafinlerdeki alkanların zincir uzunluğuna bağlı olarak, parafinler tek zincirli yani normal parafin ya da çift zincirli yani izoparafin olabilirler. Ticari dereceli parafinler petrolden elde edilir ve saf bir madde değildirler. Genelde hidrokarbon zincirinin uzun olması daha yüksek erime sıcaklığı ve ısı füzyonu demektir (Abhat 1983; Sharma and Sagara 2005).

Saf parafinler içerisinde sadece alkanları içerir. Örnek olarak en iyi bilinen parafin okta dekan (C_8H_{18}) verilebilir. Alkanlardaki erime noktası, karbon atomu sayısının artışıyla birlikte artmaya başlar. Alkanlarda 14-40 C atom sayısı aralığında erime noktası 6-80°C arasında olup ve genellikle parafinler olarak adlandırılır. Diğer yandan ticari mumlarda ise karbon sayısı 8 ile 15 arasında olabilir. Onların katı fazlarında parafinler genel olarak onların fiziksel özellikleri ve kristal yapılarındaki farklılıklarıyla iki allotropik modifikasyonda bulunur. İlk modifikasyon daha yüksek bir sıcaklıkta var olur yani maddenin erime noktasının çok az üstünde yumuşak, plastik ve bireysel kristaller iğne şeklindedir. Bir diğeri olan ikincil modifikasyon ise daha düşük sıcaklıkta var olmaktadır. Bu durumda erime noktası aşağıdadır, sert ve gevrek olup kristaller disk şeklindedirler ve bir kristalden diğere geçiş tersinirdir (Abhat 1983).

Parafinler onlardaki geniş sıcaklık aralığı ve önemli derecedeki ısı füzyonlarının elde edilmesinden dolayı, füzyon ısı depolayıcı maddeler olarak nitelendirilir. Bunlara ek olarak parafinlerin aşırı soğutma olmaksızın dondukları bilinir. Ancak masrafları göz önünde tutulduğunda parafinler gizli ısı depolamada sadece teknik derecede FDM olarak kullanılabilirler. Parafinler çoğu üreticiden kolaylıkla elde edilebilirler ve genellikle daha pahalıdır. Onlar kimyasal olarak etkisizdir ve 500°C'nin altında sabittirler. Aşağıda Çizelge 2.2'de tamamen petrolden rafine edilmemiş ve parafin karışımlara ait üreticilerin verdiği fiziksel bazı özellikler yer almaktadır (Abhat 1983; Sharma and Sagara 2005).

Çizelge 2.2. Parafin karışımlara ait üreticilerin verdiği fiziksel bazı özellikler (Abhat 1983; Demirbaş 2006).

C atom sayısı	Petrol içeriği %	Erime noktası/ Aralığı °C	Donma noktası/ Aralığı °C	Isı füzyonu Kj/kg - Kj/dm ³	Yoğunluk 20 °C - 70°C	Özgül ısı (100°C) Kj/kg.K	Termal iletkenlik W/M.K
C14	-	277,7	4,5	165 -	-	-	
C15 - C16	-	281,2	8	153 -	-	-	
C13 - C24	20	296,2	22-24	189 - 144	0,9 - 0,76	2,1	0,21
C18	0	301,2	28	244 - 189	0,814 - 0,774	2,16	0,15
C16 - C28	5	316,2	42-44	189 - 145	0,91 - 0,765	2,1	0,21
C16-C18	-	294,2	-	152	-	-	-
C20 - C33	<0,5	322,2	48-50	189 - 145	0,912 - 0,769	2,1	0,21
C22 - C45	4	300,7	58-60	189 - 150	0,92 - 0,795	2,1	0,21
C23 - C45	<0,5	340,4	62-64	189 - 150	0,915 - 0,79	2,1	0,21
C21 - C50	3	-	66-68	189 - 157	0,93 - 0,83	2,1	0,21
Parafin wax	-	337,2	-	173,6	-	-	-

Parafin mumlar ayrışma eğilimine girmezler ve kimyasal olarak sabittirler. Parafin mumlar yüksek ısı füzyonları gösterirler ve tekrarlanan erime ve donma çevrimleri sonrasında termal özelliklerinde düzenli bir bozunma göstermezler. Ayrıca parafin mumlar güvenli ve reaktif etki vermezler. Parafinler böylesine kullanışlı olmasına rağmen bazı dezavantajla sahiptirler. Öncelikli olarak onların katı fazda olması durumunda termal iletkenlikleri zayıftır. Bu durum donma sürecinde yüksek ısı transferi gerektiği zamanda probleme neden olur. Parafinler katı ve sıvı faz evreleri arasında yüksek hacimsel değişim gösterirler. Bu durum tabi ki FDM maddesinin depolanmasında sorunlara yol açar. Parafinler alevlenebilirler ancak bu etki iyi bir muhafaza ile hafifletilebilir. Parafin mumları ucuz ve makul termal enerji depolama yoğunluğuna sahip olup fakat düşük termal, iletkenliklidir. Bu yüzden daha büyük yüzey alanı gerekir (Sharma and Sagara 2005; Demirbaş 2006).

Parafin olmayan organik maddeler: Çok sayıda parafin olmayan organikler mevcuttur. Diğer bir ifade ile bu grup gizli ısı depolama için aday maddelerin en büyük kategorisini oluşturmaktadır. Bu maddelerden birçoğu yağ asitleri olarak sınırlanmış olup, diğer kısmı ise bu yağ asitlerine benzer özelliklere sahip olduğu varsayılabilir. Bunlar esterler, yağ asitleri, alkoller ve glikoller olarak bu maddeler üzerine geniş

şekilde araştırmalar yapılmıştır. Bu organik maddeler daha fazlasını oluşturan yağ asitleri ve diğer parafin olmayan organiklerdir. FDM maddelerin çoğu yüksek derecede değişik özellikleriyle beraber parafin olmayan organiklerdir. Parafinlerin aksine çok benzer özelliklere sahip olmakla beraber bu maddelerin her biri kendi özelliklerine sahip olacaktır. Ayrıca bu maddeler alevlenebilirler ve aşırı yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmamalıdır. Bu organik maddelerin bazı özellikleri şu şekilde sıralanabilir; yüksek ısı füzyonu, alevlenmeme, düşük termal iletkenlik, değişken toksiklik değeri, sabit olmayan yüksek sıcaklıklar (Abhat 1983; Sharma and Sagara 2005; Sharma *et. al* 2009).

Yağ asitleri: Yağ asitleri $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\text{COOH}$ kimyasal formülü ile karakterize edilmiş organik bileşiklerdir ve parafinler kadar aynı özelliklere sahiptir. Onların keskin faz dönüşüm avantajı, parafin maddelerin maliyetinin 2 ya da 3 katı olması dezavantajıyla denge sağlamaktadır. Bu maddeler hafif derecede aşındırıcıdır. Bazı yağ asitlerine ait düşük sıcaklıktaki termal enerji depolama sistemi uygulamaları için özellikler aşağıdaki Çizelge 2.3’de verilmiştir.

Çizelge 2.3. Yağ asitlerinin düşük sıcaklıktaki fiziksel özellikleri (Abhat 1983; Sharma and Sagara 2005).

Madde (asit)	Erime noktası/ Aralık (°C)	Isı füzyonu Kj/kg-Kj/dm ³	Yoğunluk Kg/dm ³	Özgül ısı (100°C) Kj/kg.K	Termal iletkenlik W/M.K
Kaprilika.	16,5	149 - 128	1.033 (10 °C)	1	0.148(20°C)
Kapric a.	31,5	153 - 136	0.886 (40 °C)	-	0.149(40°C)
Laurik a.	42-44	178 - 155	0.870 (50 °C)	1,6	0.147(50°C)
Miristik a.	54	187 - 158	0.844 (80 °C)	2,7	-
Palmitica.	63	187 – 159	0.847 (80 °C)	-	0.165(70°C)
Stearik a.	60- 70	203 – 191	0,941 (40 °C)	2,35	0,172(70°C)
Erusik a.	33	-	0,853 (70 °C)	-	-
Elaidik a.	47	218	0,851 (79 °C)	-	-

Yağ asitleri yenilenebilir erime ve donma davranışlarına ve az ya da hiç aşırı soğutmanın olmadığı donma özelliğiyle bilinir. Bundan dolayı yağ asitleri iyi bir FDM olarak nitelendirilirler. Stearik asitinde geniş bir sıcaklık aralığı üzerinde eridiği, 2 farklı erime noktasının olduğunu ve gizli ısı depolamada geniş bir çeşitliliğe sahip olduğunu fark edilmiştir. Ancak bu özellikler 1500 kez erime ve donma çevriminden sonra termal olarak sabitleşmektedir. Bu yüzden onların saflığı garanti edilmemektedir. Bu durum artan termal çevrim sayısı ile birlikte genel olarak stearik asitin gizli ısı füzyon değerindeki azalmayla açıklanabilir (Abhat 1983; Sharma and Sagara 2005).

2.3.2.b. İnorganik faz değıştiren maddeler

Tuz hidratlar: Bu maddeler ise yüksek hacimsel gizli ısı depolama yoğunluğundan dolayı ısı depolama maddelerinin önemli bir sınıfının formu olup ve $X.nH_2O$ ile temsil edilir. Burada X inorganik bir bileşkedir. Tuz hidratlar en eski ve en çok kullanılan FDM maddeleridir. Aslında bu maddelerin FDM olarak kullanımı ilk olarak 1947 yılının ilk başlarında yayılmıştır. Bu maddeler tuz ve su içermektedir. Onlar yalnız veya ötektik karışımlar halinde kullanılabilirler. Aşağıda Çizelge 2.4’de erime sıcaklığı aralığı 0-120°C olan bazı tuz hidratlara ait fiziksel özellikler yer almaktadır (Abhat 1983; Sharma and Sagara 2005). Demirbaş (2006) belirttiğine göre tuz hidratlar geniş bir enerji depolama yoğunluğuna ve yüksek termal iletkenliğe sahiptir.

Çizelge 2.4. Bazı tuz hidratlara ait fiziksel özellikler (Abhat 1983; Sharma and Sagara 2005).

Madde	Erime noktası (°C)	Isı füzyonu Kj/kg-Kj/dm ³	Yoğunluk Kg/dm ³	Özgül ısı (100°C) Kj/kg.K	Termal iletkenlik W/M.K
H ₂ O	0	333 - 306	0.917 (0 °C) 0,998 (20°C)	2,09 (sıvı) 4,18 (sıvı)	2,2 (sıvı) 0,6 (20 °C)
KF.4H ₂ O	18,5	231- 336	1,455 (18°C) 1,447 (20°C)	1,84 (sıvı) 2,39(sıvı)	- -
CaCl ₂ .6H ₂ O	29,7	171- 256	1,71 (25° C)	1,45 (sıvı)	-
NaSO ₄ .10H ₂ O	32,4	254 - 377	1.485 (katı)	1,93 (katı)	0,544
Na ₂ HPO ₄ .12H ₂	35	281 - 405	1.520 (katı) 1.442 (sıvı)	1,7 (katı) 1,95 (sıvı)	0,514 (32°C) 0,476 (49°C)
Zn(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	36,4	147- 304	2.065 (14°C)	1,34 (katı)	-
Na ₂ S ₂ O ₃ .5H ₂ O	48	201 - 322	1,73 (katı)	1,46 (katı)	-
Ba(OH) ₂ .8H ₂ O	78	267- 581	2,18 (katı)	1,17 (katı)	-
MgCl ₂ .6H ₂ O	116	165 - 239	1.57 (20°C) 1,442 (78°C)	1,72 (katı) 2,82 (sıvı)	- -
Na ₂ S ₂ O ₄ .10H ₂ O	32	252	1,485 (24°C)	-	0,544
Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	89-90	162-167	1,550 (94°C)	-	0,49(95°C)
NaC ₂ H ₃ O ₂ .3H ₂ O	137	172	1,45	-	-
NaS ₂ O ₃ .5H ₂ O	48	209	1,6	-	-

Tuz hidratlar FDM'lerin en önemli grubudur ve gizli ısı termal enerji depolama sistemlerinde onların kullanımı için aşırı derecede çalışmalar yapılmıştır. Erimiş tuzların davranışında uyumlu, uyumsuz ve yarı uyumlu olmak üzere üç tip tanımlanabilir. Erime sıcaklığında hidratlı suda susuz tuz tamamen çözüldüğü zaman uyumlu erime oluşur. Tuz tamamen çözülmediği durumda uyumlu erime olmaz ve benzer şekilde faz değişimi boyunca katı ve sıvı fazlar olduğunda yarı uyumlu erime olarak adlandırılır. Yoğunluk farklılıklarından dolayı katı fazlarda depolayıcının alt kısmına yerleşir ve bir ayrışma gerçekleşir. Eğer özel önlemler alınmazsa bu durumda tersinmezlik olmaz. Tuz hidratlarda diğer bir önemli problemde sıvı tuz hidratların donma öncesi aşırı soğutulmasında onların zayıf öz çekirdeklenme sonuçlarıdır. Aşırı soğutmayı azaltmak adına uygun önlemler kabul edilmelidir. Literatürde bunun için

tipik olarak metotlar önerilerek çözüm yolu denenmiştir (Abhat 1983; Sharma and Sagara 2005).

Bir diğer konu olarak tuz hidratların kolay elde edilebilmesi ve düşük maliyetli olması ısı depolama uygulamaları için onları çekici kılmaktadır. Bu maddeler arasında ucuz ve çok miktarda elde edilebilirlik açısından $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ve $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ öne çıkmaktadır. Diğer ısı depolama FDM'leri ile kıyaslandığında tuz hidratlar sabit bir erime noktasına yüksek termal iletkenliğe sahiptirler. Bu durum birim depolamanın içinde ve dışında ısı transferini artırabilir. Ayrıca onlar azalan depolama ebadına karşılık yüksek ısı füzyonuna sahiptirler ve bu maddeler diğer FDM'ler den daha az hacim değişimi gösterirler. Bu yüzden hacim değişikliklerini de göz önüne alarak bir depolama kabının tasarımı kolaylaşmış olur (Abhat 1983; Sharma and Sagara 2005).

Tabi ki tuz hidratların bu cezbedici özelliklerinin yanında bünyesinde bazı istenmeyen özellikleri de barındırmaktadır. Bu dezavantajların başında hidratların ya da susuz tuzların ayrışmasıdır yani bir fazın dışarı çıkma eğilimidir. Bu durumda ısı depolama için aktif elde edilen hacim azalmış olur. Örnek olarak Abhat (1983), $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ bileşiğinin 1000 erime ve donma çevrimi sonrasında ısı füzyonunda %73'ün üzerinde bir azalma olduğunu rapor etmiştir. Bu sorunun çözülmesinde her ne kadar karışımın ısı depolama karakterlerinin negatif yönde etkilese ve karışım zamanla azalmış olsa da, bu sorun jelleşmiş veya koyulaştırılmış karışımları kullanılarak bir ölçüde ortadan kaldırılabilir. Tuz hidratlar diğer FDM'lerin donma noktasında kristalleşmeye başlamadıkları için onla süper soğuma göstermiş olurlar. Depolama ortamında kristal büyümesini başlatmak için uygun çekirdeklenme maddeleri kullanılarak bu gibi problemlerden kaçınılabilir. Tuz hidratların istenmeyen bir diğer özelliği ise metal depolayıcılarda korozyona olan eğilimleridir. Bu yüzden bir ısı depolama işleminde her zaman depolama kabının ve kullanılacak FDM'in uyumluluğuna dikkat edilmelidir (Sharma and Sagara 2005).

Metalikler: Bu kategori kendi içerisine düşük erime metallerini ve metal ötektiklerini dâhil eder. Bu metalikler kendi ağırlık problemlerinden dolayı FDM sektöründe henüz

ciddi şekilde önemsenmiş değildir. Ancak hacim önemsendiği zaman birim hacim başına yüksek ısı füzyonundan dolayı onlar muhtemel adaylardır. Bununla birlikte onlar yüksek termal iletkenliğe sahiptir böylece dolu olanlar eklenmiş ağırlıklarıyla sorun çıkarmazlar. Metaliklerin kullanımı çok sayıda sıra dışı mühendislik problemlerini getirir. Metalikler ve diğer FDM'ler arasındaki büyük bir farklılık, onların yüksek termal iletkenliğidir. Bu maddelerin özelliklerinden bazıları; birim ağırlık başına düşük ısı füzyonu, birim hacim başına yüksek ısı füzyonu, yüksek termal iletkenlik, düşük özgül ısı ve nispeten düşük buhar basıncı olarak sıralanabilir. Bu maddeler için Çizelge 2.5'de bazı özelliklere yer verilmiştir (Sharma *et al.* 2009; Rathod and Banerjee 2013).

Çizelge 2.5. Bazı metalik FDM'lere ait özellikler

Madde	Erime noktası (°C)	Gizli ısı değeri (Kj/kg)
Galyum-galyum antimun ötektik	29,8	-
Galyum	30	80,3
Bi-Cd-In ötektik	61	25
Bi-Pb-In ötektik	70	29
Bi-In ötektik	72	25
Bi-Cd- tin ötektik	96	-
Bi-Pb ötektik	125	-

2.3.2.c. Organik ve inorganik ötektik bileşikler

Ötektik madde iki ya da daha fazla bileşenin bir minimum erime bileşimidir. Her birinin erime ve donmaları uyumludur. Bu tür bileşikler sabit bir erime ve donma noktasına sahip oldukları için gizli ısı depolama maddeleri olarak nitelendirilir. Ötektikler yakın bir kristal karışımında oldukları için neredeyse her zaman ayrışma olmaksızın erir ve donar. Erime her iki bileşende aynı anda sıvılaşır. Bazı ayrışan FDM bileşenleri bazen yanlışlıkla minimum erimeden dolayı ötektikler olarak adlandırılırlar. Bileşenler faz değişimi süresince bir peritektik reaksiyona maruz kalırlar ancak onlar daha uygun şekilde peritektik olarak adlandırılmalıdırlar. Aşağıdaki Çizelge 2.6'da bazı ötektik maddelerin listesi verilmiştir. (Abhat 1983; Sharma *et al.* 2009).

Çizelge 2.6. Bazı organik ve inorganik ötektik bileşiklerin fiziksel özellikleri (Abhat 1983; Sharma and Sagara 2005; Sharma and Sagara 2005).

Madde (Bileşikteki ağırlığı %)	No	Erime noktası (°C)	Isı füzyonu Kj/kg-Kj/dm ³	Özgül ısı Kj/kg.K
Na ₂ SO ₄ (%31) ve NaCl (%13)		4	234 -	-
CaCl ₂ (%48) ve NaCl (%4,3)		26,8	-	-
Ca(NO ₃) ₂ .4H ₂ O (%67)	1	30	136 - 228	-
Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O (%33)		30	136 - 228	-
Palmitik asit (%74,9)	2	50	192 -	2,04 (katı)
Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O(%53)	3	59,1	144 - 232	1,34 (katı)
MgCl ₂ .6H ₂ O (%47)		59,1	144 - 232	3,16 (sıvı)
Al(NO ₃) ₂ .9H ₂ O (%47)	4	61	148 - 249	-
Napthalene + Benzoic Acid %(67.1+32.9)	5	67	123,4	-
AlCl ₃ +NaCl+ZrCl ₂ %(79+17+4)	6	68	234	-
LiNO ₃ (27 %), NH ₄ NO ₃ (68 %)	7	81,6	111 - 205	1,07 (katı)
NH ₄ Cl (5 %)				2,20 (sıvı)
LiNO ₃ + NH ₄ NO ₃ +NaNO ₃ %(25+65+10)	8	80,5	113	-
AlCl ₃ +NaCl (%66+%34)	9	93	201	-

Polialkoller: Polialkoller, daha düşük sıcaklıkta heterojen bir durumdan yüksek sıcaklıkta yüzey merkezli kübik bir forma bir yapı değişiminde enerji depolarlar. Katı ve sıvı FDM'ler üzerinde birçok avantaja sahiptirler. Bu avantajlardan bazıları küçük hacim değişimi, maddelerdeki bozulmanın ve sızıntının olmamasıdır. Bu avantajlar yanında yüksek faz değişim sıcaklığı, düşük gizli ısı ve yüksek maliyet gibi dezavantajları getirmektedir (Sharma and Sagara 2005).

2.2.3. Faz değiştiren maddelerin kullanım alanları ve uygulamaları

Otomotiv endüstrisinde içten yanmalı motorlarda FDM'ler motorların soğutulması, araçlarda termal konfor, katalitik konvertörlerin ön ısıtması, motorların ön ısıtma işlemi ve diğer uygulamalar için kullanılmıştır (Gümüş and Uğurlu 2011).

Bunlara ilaveten çok değişik alanlarda FDM ile ilgili yapılmış çalışmalardan bahsedilebilir.

Büyükbıçakcı (2006) tarafından belirtildiğine göre, FDM'ler Almanya'da bir okul binasının ısıtılması için kullanılmış ayrıca İsveç'te bir şirket kapsüllenmiş glober tuzlarını FDM olarak kullanarak ısıtma ve soğutma sistemleri üretmiş ve fanların enerjisi fotovoltaiik güneş enerjisi sistemiyle sağlamıştır.

Uğurlu (2008) kendi çalışmasında bahsettiğine göre FDM'lerin, telefon panolarında, taşımacılıkta, bina ve suyun ısıtılmasında, yapı malzemelerinde, ikram servisinde, seralarda, otomobillerde ve elektronik alanlarında kullanıldığını öne sürmüştür.

Yine benzer şekilde Uğurlu (2012) çalışmasında FDM'lerin otomotiv endüstrisinde, araçların termal konforu için, katalitik konvertörlerin ön ısıtması için, LPG basınç regülâtöründe ve araç üzerinde değişik amaçlara yönelik diğer şekillerde kullanıldığını dair yer vermiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Deney Düzenekinin Tanıtılması ve Kullanılan Ölçüm Aletleri

Tez çalışmamıza ait deneylerin tamamında hidrolik fren (dinamometre) tezgâhına yerleştirilen, Super Star 7728 marka ve modele sahip, su soğutmalı, 4-zamanlı, direkt enjeksiyonlu bir dizel motor kullanılmıştır. Kullandığımız bu motora ait teknik özellikler Çizelge 3.1’de ve deney motoruna ait görüntü Şekil 3.1’de verilmiştir.

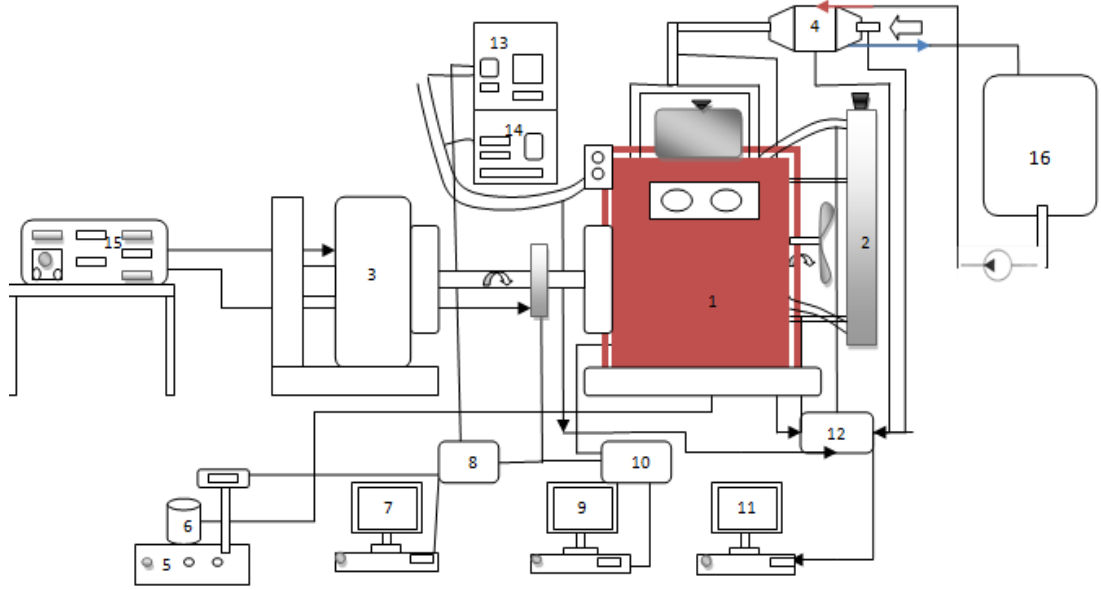
Çizelge 3.1. Deneylerde kullanılan motorun teknik özellikleri

Motor tipi	Super Star 7728
Silindir tipi-sayısı	Sıra-2
Zaman sayısı	4-zamanlı
Soğutma sistemi	Su soğutmalı
Supap mekanizması tipi ve sayısı	OHC-4
Model yılı	1998
Strok, mm	100
Çap, mm	98
Toplam silindir hacmi, cm ³	1540
Soğutma suyu kapasitesi, lt.	6
Sıkıştırma oranı	17 : 1
Enjeksiyon türü	Direkt enjeksiyonlu
Maksimum moment	2500 d/dak’da 8 kgm
Maksimum güç	2750 d/dak’da 28 HP
Rölanti hızı	800±50 d/dak
Yakıt	Dizel



Şekil 3.1. Deney motoruna ait görünüm

Deney düzeneğinin önemli bölümünden biri olan ısı değiştiricisinin düzeneğe yer alması itibariyle mevcut deney düzeneğine ait şematik görünüm de Şekil 3.2’de verilmiştir.

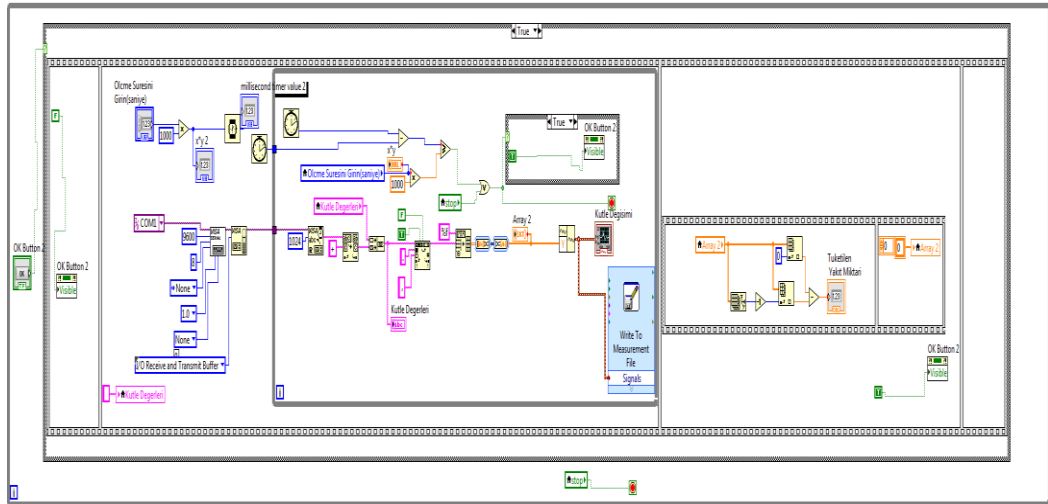
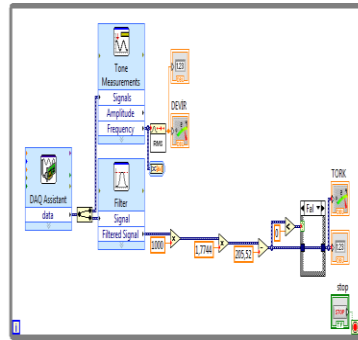
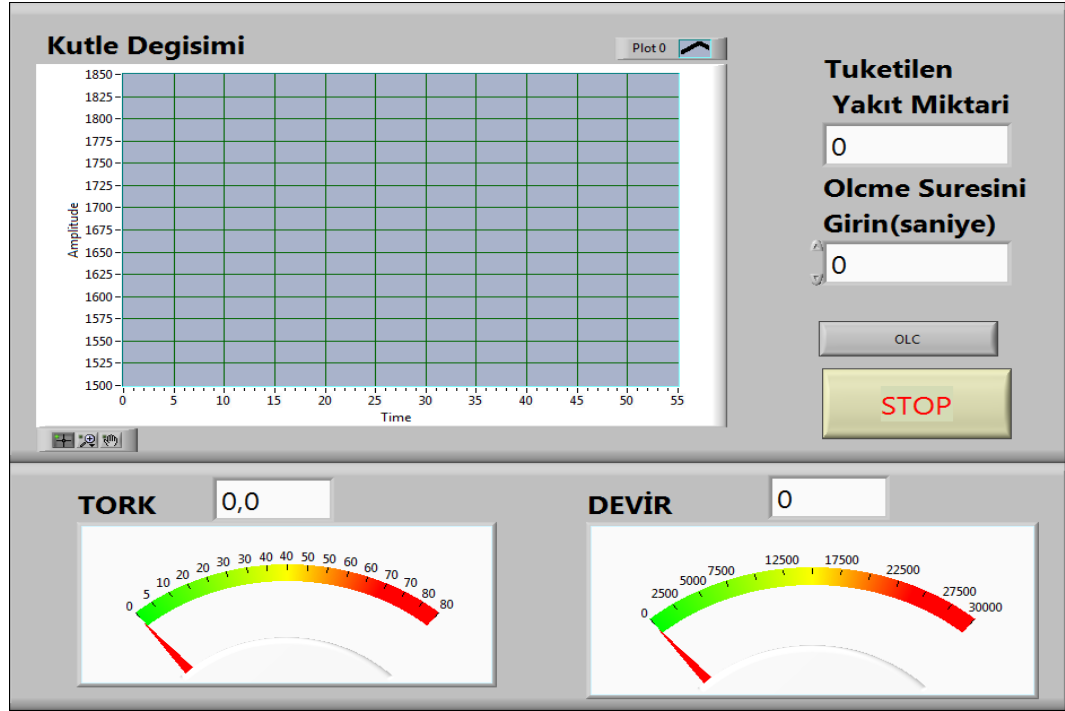


Şekil 3.2. Deney düzeneğinin şematik görünümü

Çizelge 3.2. Deney düzeneği tanıtımı

1- Motor	9- Kişisel Bilgisayar-2
2- Radyatör	10- NI PCI-6250
3- Hidrolik fren	11- Kişisel Bilgisayar-3
4- Isı değiştirici	12- Advantech PCL 818 HG
5- Terazi	13- Egzoz Emisyon Cihazı
6- Yakıt deposu	14- Isılilik Ölçüm Cihazı
7- Kişisel Bilgisayar-1	15- Kontrol ünitesi
8- NI PCI-6259	16- Sıcak su tankı

Yukarıdaki deney düzeneğine ait şematik görünümde yer alan bazı numaralandırılmış kısımlardan kısaca bahsedebiliriz daha sonra alt başlıklar halinde aşağıda detaylandırılacaktır. Motorun (1) yakıt ihtiyacını karşılayan yakıt deposu (6), TEM marka BT1TA tip bir terazi (5) üzerinde konumlandırılmıştır. Böylece motorun çalışma süresi boyunca tüketilen yakıt değişimi kaydedilecektir. Bu değişim, daha önceden LabVIEW ortamında hazırlanan bir program ile izlenmiştir. Terazi değişim verileri bir RS232 bağlantı kablosu aracılığıyla (8) bilgisayara (7) aktarılmıştır. Hazırlanan LabVIEW programına ait ön panel ve blok diyagram görüntüleri aşağıda Şekil 3.3’de gösterilmiştir. Teraziden alınan veriler bu program sayesinde anlık olarak alınıp bilgisayar ortamında işlenmekte ve ayrıca verilerin değişiminin grafiksel bir ortamda izlenmesi de mümkündür.



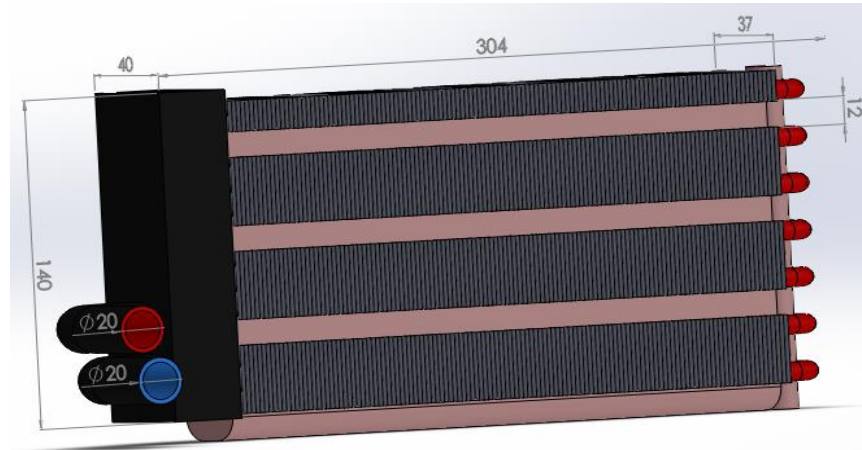
Şekil 3.3. LabVIEW programına ait ön panel ve blok diyagram görüntüsü

3.1.1. FDM ile doldurulmuş ısı değıştirici

Deneylerde motor silindirlerinde kullanılan hava, öncesinde hazırlanan bir ısı değıştiricisi içerisinden geçerek kullanılmıştır. Isı değıştiricisinin her bir gidiş-dönüş kanalları arasında bir dolu kanal bırakılarak birer kanal açılmıştır. Bu açılan boş kanallar arasına bakır levhadan hazırlanan ve içerisi FDM malzeme ile doldurulmuş kutular yerleştirilmiştir. Ayrıca ısı değıştiricisinin çevresi de ek olarak FDM malzeme ile desteklenmiştir. Isı değıştiricisinin işleme tabi tutulmadan önceki hali şekil 3.4’de, Solidworks programında modellenmesi şekil 3.5’de ve işlem sonrası (kanal açma) hali şekil 3.6’da verilmiştir.



şekil 3.4. Isı değıştiricisinin işleme tabi tutulmadan önceki ilk hali



şekil 3.5. Isı değıştiricisinin Solidworks programında modellenmesi



Şekil 3.6. Isı değiştiricisinin işleme tabi tutulduktan sonraki hali

Isı değiştiricisi için tasarlanan bakır levha kutular, açılan kanallara göre ölçü alınıp dikdörtgen şekil verilerek, birleşim yerlerinden lehim yapılp dış evre ile irtibatı engellenmiştir. Hazırlanan bakır kutular şekil 3.7’de verilmiştir.

Çalışmada kullanılan ısı değiştiricisinin dış ortamdan izole edilmesi ve muhafazası için, sac malzeme kullanılarak iki ucu (hava giriş ve çıkış bölgeleri) koni şeklinde tasarlanan bir muhafaza yapılmıştır. Hazırlanan muhafaza şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.7. İçerisine FDM doldurulmuş bakır plakalar

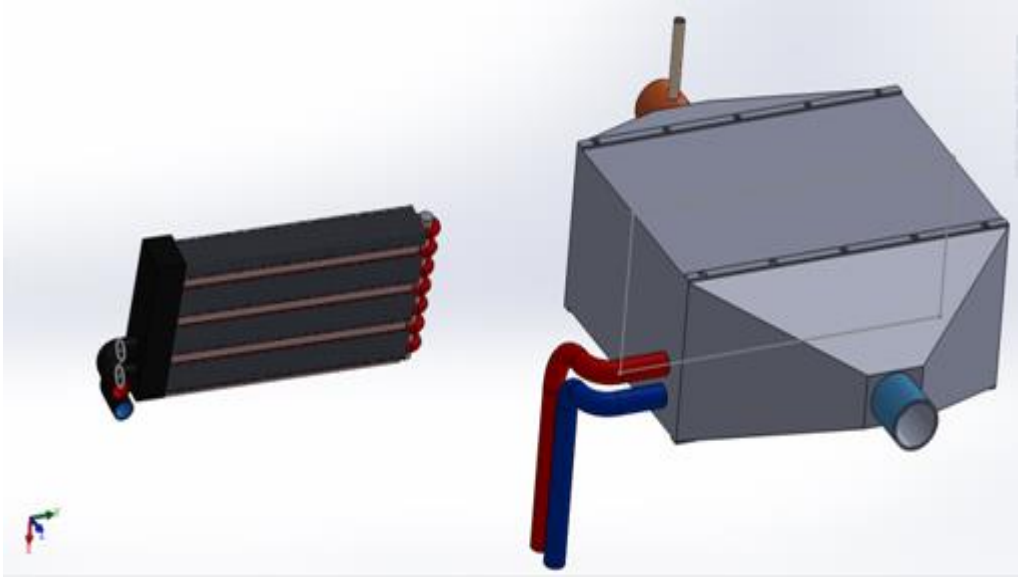


Şekil 3.8. İçerisinde ısı değıştiricisinin sabitleneceğı muhafazanın görünümü

Şekil 3.9 ile Solidworks programında hazırlanmış olan muhafaza ve içerisinde kullanılacak olan ısı değıştiricisine yer verilmiştir.

Isı değıştiricisindeki giriş ve çıkış kanallarını takıldıktan sonra FDM ile dolu olan bakır kutular gerekli kanallara yerleştirilmiş ısı değıştiricisi üzerinde sabitlenmiş ve Şekil 3.10’da hazırlanan ısı değıştiricisi verilmiştir.

Muhafazanın iç çevresi de yine FDM malzeme ile desteklenerek yerine sabitleştirilmiş ve muhafaza kapatılarak bir sonraki aşama olan izolasyon hazırlık durumuna gelmiştir. Fakat izolasyon öncesinde hem yapılan işlemlerin doğruluğı için hem de sistemin deneysel çalışma durumunda nasıl davranacağını kontrol etmek için ön bir deney yaparak, sistemin izole safhasına geçilebileceğine karar verildi. Şekil 3.11’de bu safha gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Isı değiştiricisi ve muhafaza



Şekil 3.10. Hazırlanan ısı değiştiricisine ait görünüm



Şekil 3.11. Hazırlanan sistemin ilk deneme yapımına ait görünümü

Sistemin deneme aşamasının bitmesi itibariyle bu muhafazanın da dış ortamla etkileşimini minimum düzeye indirmek için dış çevresi önce yalıtım malzemesi ile kaplanıp ve ardından son olarak alüminyum folyo ile de tekrardan çevrelenerek gerekli yerlere ısıl çift eklenip deneyler için hazır hale getirilmesi Şekil 3.12 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Deney öncesi hazır hale gelen ısı değışiricisi ve muhafaza

Sistemin tamamında kullanılan FDM malzemesinin kullanım yerleri ve kullanım miktarları aşağıdaki Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.3. FDM maddesinin ısı değiştiricisinde kullanım miktarları

Isı Değiştirici	Boş Ağırlık (gr)	Dolu Ağırlık (gr)
	İşlem öncesi/sonrası (538/494,5)	
Kutu-1	113	230
Kutu-2	111	219
Kutu-3	114,5	160,5
Kutu-4	127,5	174,5
Kutu-5	97,5	156
FDM deste torbanın toplamı	60	200
Toplam	653,5	1140
Net kullanılan FDM malzeme	486,5	

3.1.2. Veri iletişim kartları ve amplifikatör

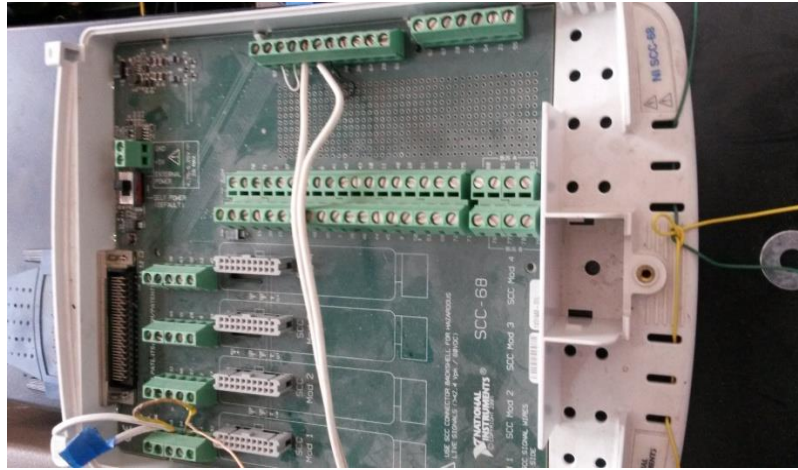
Deneylerde motora ait basınç eğrilerinin elde edilmesi ve sensörden gelen sinyalin izleyebilmek amacıyla KISTLER markaya sahip basınç çeviricisi ve bir amplifikatör birlikte kullanılmıştır. Şematik görünümü Şekil 3.13’de verilmiştir.



Şekil 3.13. KISTLER marka bir amplifikatör

Düzenekteki değişimleri izlemek ve analizini gerçekleştirmek için, veri iletişim kartlarının o verileri işlenebilecek hale getirdikten sonra bilgisayar ortamında değerlendirmeye hazır hale gelir. Böylece farklı sensörlerden (tork, krank mili sensörü gibi) alınan sinyalleri bu şekilde farklı ihtiyaçlara göre de üzerinde değişiklikler yaparak istenen bilgilerin elde edilmesi mümkün olur.

Çalışmamızda verilerimizi okunup işlenebilmesi için National Instruments firmasının ürünü olan PCI-6259 kodlu, 4 adet 16 bitlik analog çıkış ve 32 bitlik analog giriş özelliğine sahip, yüksek hızlı çok fonksiyonlu M serisi bir veri iletişim kartı kullanılmıştır. Bu kart, NI-STC 2 sistem kontrolcüsü, NI-PGIA 2 programlanabilir bir amplifikatör ve NI-MCal kalibrasyon teknolojisi ile birlikte hassasiyet ve performansta artış gösterebilmektedir. Bu kart, tüm Windows ve önceki işletim sistemleri ile uyumludur. 1,25 MS/s'eye kadar veri örnekleme oranına sahip bu veri iletişim kartının maksimum gerilim aralığı -10V ile 10V arasında değişim göstermektedir. Veri kartının görünümü Şekil 3.14'de verilmiştir.

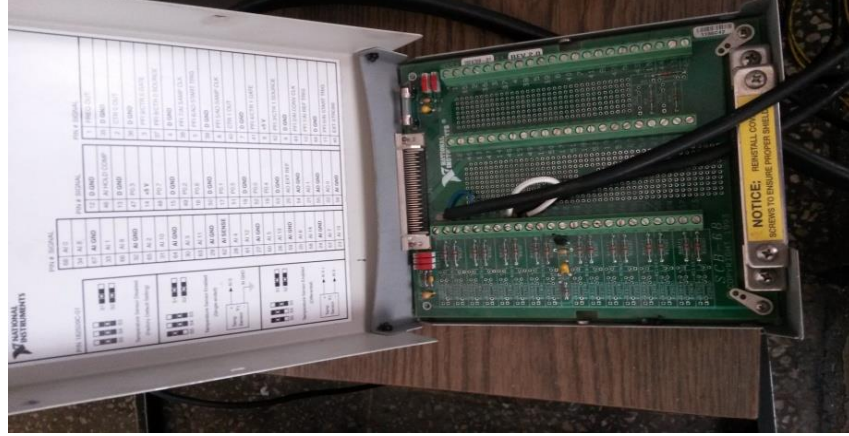


Şekil 3.14. PCI-6259 veri iletişim kartı

Benzer olarak National Instruments firmasının PCI-6250 koduna sahip bir veri iletişim kartının kullanımı sayesinde basınç verilerinin anlık izleme ve bu verilerin analizlerini kaydetme işlemleri yapılmıştır. Yine 16 bitlik 80 analog girişe ve 16 bitlik 2 adet analog

çıkışa sahip bu kartımız üzerinde 24 adet dijital giriş ve çıkışı da (I/O) barındırmaktadır.

Şekil 3. 15’de PCI-6250 veri iletişim kartının görünümü verilmiştir.



Şekil 3.15. PCI-6250 veri iletişim kartı

Bu çalışmanın gerçekleştirildiği süreç boyunca her bir deneyden alınan verilerin analizini yapmak için; FDM’li ısı değiştiricisine giren havanın sıcaklığı, ısı değiştiricisinden geçerek motora giden havanın sıcaklık ölçümü, yine ısı değiştiricisi içerisindeki FDM doldurulan bakır kutuların yüzey sıcaklığı, egzoz gazları çıkış sıcaklığı ve motor soğutma suyu giriş-çıkış sıcaklığı ısı çiftleri sayesinde ölçülerek değerler Advantech PCL 818 HG kartı vasıtası ile bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Şekil 3.16’da bu veri kartına ait görünüm verilmiştir.



Şekil 3.16. Advantech PCL 818 HG kartı ile sıcaklık ölçümleri

3.1.3. Motor krank aç sensörü

Yapılan çalışmamızda yaklaşık sabit devir sayısı kullanılmıştır. Burada motor devrini ölçmek için krank miline bağlanmış olan sensörden yararlanabiliyoruz. İndüktif bir yapıda üretilen bu algılayıcı krank sensörü olarak adlandırılıyor. Krank sensörümüz, krank miline bağlı haldeki şaft döndürücü üzerindeki diske sabitlenmiş durumdadır ve böylece milin dönmesi ile birlikte diskin üzerinde bulunan bir çentik manyetik alan değişikliği oluşur ve bu oluşan manyetik alan değişiklikleri de darbe sinyalleri şekline dönüştürülür.

Çalışmalarımızda kullandığımız devir sayısı tespitinde, devir sinyalinin PCI-6259 veri toplama kartı aracılığıyla bilgisayar ortamına aktarılıp LabVIEW ortamında hazırlan program üzerinde gözlenmiştir.

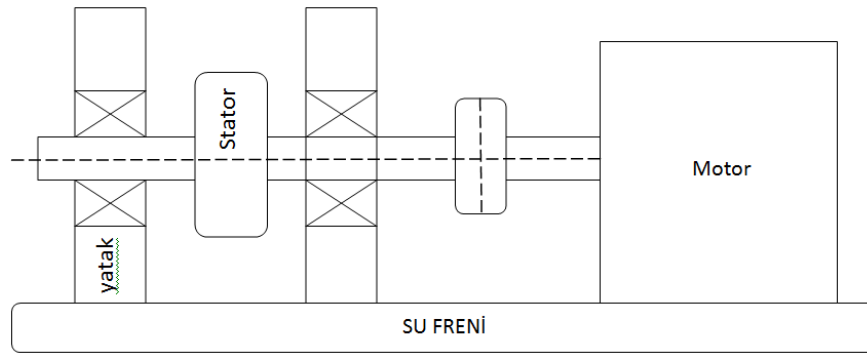
3.1.4. Güç ölçüm ünitesi (hidrolik fren)

Bunlara su freni de denir. Hidrolik dinamometrelerde; motor volanına bağlanan bir rotor, ve rotoru çevreleyen yataklar üzerine oturtulmuş bir stator bulunmaktadır. Frenleme rotor üzerindeki kanatçıkların, cihazın içine gönderilen suya çarpması sonucunda oluşur. Frenleme sonucunda oluşan moment miktarı saptanarak motorun gücü ölçülür. Su frenleri motor yüküne bağlı olarak çeşitli tiplerde yapılmakta ise de çalışma ilkeleri tümünde aynıdır.

Aşağıdaki Şekil 3.17’de görüldüğü üzere statorun içi belirli bir değere kadar su ile doldurulur. Ardından motor rotoru çevirmeye başladığında, rotorun kanatları suyu dışa doğru fırlatır ve çevrede girdap hareketleri yapan bir su tabakası oluşur. Böylece girdap, dönme hareketleri ve radyal hareketler gibi karmaşık hareketler yapan, bir taraftan ısıtarak motorun ürettiği mekanik enerjiyi yutarken, öte yandan motorun döndürme momentine eşit bir momentle su freninin statorunu çevirmeye çalışır.

Deneyleerde yüklemeyi gerçekleştirmek için laboratuvarımızda mevcut olan su ile yükleme sağlayan hidrolik fren sistemi kullanıldı.

Bu ünite sayesinde motor tarafından üretilen gücü yutmak ve ölçmek amaçlanmıştır. Yer altına gizlenmiş olan 25 ton kapasiteli su tankını kullanarak hidrolik frenimiz işlevini gerçekleştirmektedir. Bir pompa yardımı ile basınçlandırılan depodaki su, bu haliyle sisteme gidiyor. Su freni olarak da adlandırılan bu sistemde motorun miline bağlı olarak dönen kanatlı bir rotor Bu sistemin stator kısmında bir yük hücresi yardımıyla tork ölçüm düzeneği mevcuttur.



Şekil 3.17. Hidrolik frene ait şematik görünüm

Statora bağlı olan yük hücresi ile tork değeri ölçülür. Oluşan bu sinyaller deney düzeneğindeki PCI-6259 veri iletişim kartı ile bilgisayara aktarılarak, LabVIEW ortamında hazırlan programla “Nm” biriminde okunması yanı sıra düzenekte yer alan kontrol ünitesi üzerindeki göstergeden “kg” olarak da ayrıca okunabilmektedir.

3.1.5. Piezo basınç çeviricisi

Piezo elektrik etkisi quartz tekil kristaline basınç uygulandığında elektrik gerilimi üretmesi olayına verilen isimdir. Piezo etkisi, malzemede meydana gelen polarizasyon yoğunluğundaki değişim etkisiyle ilişkilidir. Piezo kelimesi Yunanca’dan türetilmiş ve “sıkıştırmak, basınç uygulamak” anlamlarına gelmektedir. Piezo-elektrik basınç

çeviricileri, anlık bilgi elde edilmesi gereken uygulamalarda yüksek güçlü elektro-akustik bir çeviricidir. Yapılarında kullanılan piezo-elektrik elemanlar sayesinde (kurşun zirkonat titanat kristalleri gibi) bir dış kuvvet etkisine maruz kalırlarsa, karşılıklı yüzeylerde elektrik yük oluşumları meydana gelmektedir. Böylece silindir içerisinde meydana gelen basınç değerleri elektriksel gerileme dönüşerek bir basınç çevirici veri iletişim kartı ile bu değerlerin analizi mümkün olmaktadır.

3.1.6. Egzoz emisyon cihazı

Çalışmamız içerisinde yer alan egzoz gazlarının analizi kısmı ise yine laboratuvarımızda mevcut olan, egzoz gazlarının emisyon değerlerinin ölçümünde hem benzinli hem de dizel motorlarda kullanıma elverişli olan Bosch marka BEA 270 tipli bir egzoz emisyon cihazı ile yapılmıştır.

Bu tez çalışmasında kullanılan içten yanmalı motorun egzoz gazlarını oluşturan bileşenler üzerinde nasıl bir etkisi olduğunu, deneylerde kullanılan bu cihaz vasıtasıyla karbon monoksit (CO), yanmamış hidrokarbon (HC), karbon dioksit (CO₂) ve azot oksit (NO_x) emisyonları ile ölçülebilecek ve böylece çıkan emisyon değerleri ile grafiksel analizler yapılarak yorumlanacaktır. Emisyon değerleri ppm ve yüzde hacim olmak üzere her iki şekilde de ifade edilebilmektedir.

Ayrıca bu cihazda egzoz gazları içerisindeki oksijen miktarının belirlenmesiyle hava-yakıt oranı (lambda) hesaplanabilir ve ölçülen emisyon değerleri ile birlikte cihazın ön yüzündeki dijital ekranda gösterilir.

Kullanılan egzoz emisyon cihazının ölçüm aralığı ve hassasiyeti Çizelge 3.4’de ve egzoz emisyon cihazına ait görünümde Şekil 3.18’de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Egzoz emisyon cihazının ölçüm aralığı ve hassasiyeti

Bileşenler	Ölçüm Aralığı	Hassasiyet
CO	0,000 – 10,00 % Hacim	0,001 % Hacim
HC	0 – 9,999 ppm Hacim	1 ppm Hacim
CO ₂	0,00 – 18,00 % Hacim	0,01 % Hacim
O ₂	0,00 – 22,00 % Hacim	0,01 % Hacim
NO	0 – 5000 ppm Hacim	≤ 1 ppm Hacim
Lambda	0,500 – 9,999	0,001

**Şekil 3.18.** Egzoz emisyon cihazı

3.1.7. İslilik ölçme cihazı

İslilik oranı ise, Assemblad markasına ait ve ölçüm hassasiyeti %1 olan OPA 189 modeli egzoz duman analiz cihazı ile ölçülmektedir. Bu cihazda egzoz gazlarının ıslilik oranı yüzdelik olarak 0 ile 99,9 arasında gösterilmektedir. Cihaza ait görünüm Şekil 3.19’da verilmiştir.



Şekil 3.19. İslilik oranı tespit cihazı

Deneyler sırasında egzoz gazındaki ıslilik oranı ve egzoz emisyon değęerleri, iki ayrı kamera ile MATLAB dilinde yazılan bir program sayesinde eş zamanlı olarak çalışan ve her 5s’de fotoğraf çekme şartıyla kameralar ile kaydedilerek değışimler gözlemlenmiştir.

3.1.8. Sıcak su tankı ve ısı değıştiricisinde kullanımı

Deneylerde kullanılacak ısı değıştiricisi hazırlandıktan sonra motora bağlantısı yapıldı. Muhafaza içindeki sabitlenmiş olan ısı değıştiricisine bir giriş ve bir çıkış olmak üzere 2 adet akışkan dolaşım hortum bağlantısı yapılmıştır. Mevcut hattın gidiş koluna bir su pompası ilave edilip bu girişinde sıcak su tankına bağlantısı yapılmıştır. Böylece istenilen sıcaklık değęerlerine ulaşmak için su dolaşımı yapılacaktır. Bu sistemde Şekil 3.20’de verilmiştir.



Şekil 3.20. Su tankı ve pompanın gösterimi

3.1.9. Deneylerde kullandığımız FDM ve özellikleri

Çalışmamızda RUBITHERM (RT50) ticari adıyla bilinen bir FDM maddesi kullanılmıştır. FDM maddemiz katı ve sıvı arasındaki faz değişimi proseslerinde neredeyse sabit bir sıcaklıkta kalarak, büyük miktarlarda termal enerjiyi saklamak ve bırakmak için ısı depolama malzemesi olarak kullanılan saf bir FDM'dir. Isı depolama uygulamalarında RT50 faz değiştiren malzemeleri yüksek verim sağlamakla birlikte çalışılan sıcaklıktaki, küçük farklar olsa dahi ve çok küçük hacimler için bile uygulanabilirler.

Kullanılan FDM maddesinin bazı özellikleri aşağıda madde olarak verilmiştir:

- Erime sıcaklık aralığı -4°C - 100°C aralığındadır.
- Yüksek ısıl enerji depolama kapasitesine sahiptirler.

- İzafi olarak sabit sıcaklıkta ısı depolama ve serbest bırakma işlevine sahiptir.
- Hiçbir aşırı soğutma etkisi yoktur, kimyasal olarak asaldırlar.
- Uzun ömürlü bir yapıya sahip olup faz değişim süreçlerinde sabit kararlı bir performansa sahiptirler.

Çizelge 3.5. Deneylerde Kullandığımız FDM'nin Özellikleri

Erime aralığı	45-51	[°C]
Isı taşıma kapasitesi $\pm 7,5\%$	168	[kJ/kg]
43°C ile 58°C sıcaklıkları arasındaki gizli ve duyulur ısı kombinasyonu	47	[Wh/kg]
Özgül ısı kapasitesi	2	[kJ/kg·K]
Katı fazdaki yoğunluğu (15°C)	0,88	[kg/l]
Sıvı fazdaki yoğunluğu (80°C)	0,76	[kg/l]
Isıl iletkenliği(her iki fazda)	0,2	[W/(m·K)]
Hacim genişlemesi	13,63	[%]
Parlama noktası	>200	[°C]
Maksimum çalışma sıcaklığı	70	[°C]

3.2. Deneysel Yöntem

Bu tez çalışmamız boyunca yapılan tüm deneylerde aynı türde ve tek bir dizel yakıt kullanılmıştır. Tez çalışmamızın odak noktası olan, dizel motorda soğukta ilk hareket ve emisyon değerleri problemine yönelik olarak sistemimize bir ısı değiştiricisi eklenmiştir.

Çalışmamızda incelediğimiz nokta, bu soğuk çalışma problemini farklı bir malzeme kullanarak ve farklı bir metot deneyerek davranışını incelemektir. Ayrıca bu metotla birlikte, yapılan çalışmanın bu problemin çözümünde nasıl bir etki ettiğine ve bu şekilde bir yol izlenmesi durumunda egzoz gazı emisyon değerlerindeki etkisinin nasıl olacağını gözlemlemektir.

Bu amaçla ilk düşüncemiz hazırlanacak olan bir ısı değiştiricisi aracılığıyla silindirlere giden havanın sıcaklığı üzerine bir hâkimiyet kurmaktır. Böylece farklı sıcaklıklarda giren havanın, motorun çalışmasını ve emisyon değerlerini nasıl etkilediğini analiz edebileceğiz. Bu yüzden ısı geçişinin kolaylaşması açısından seçilen bakır levhalardan kutular yapıldı ve açık kenarlar lehimlenerek kapatıldı. Bu bakır kutuların üst kısımlarından delik açılarak seçtiğimiz faz değiştirici malzeme olan mum eritilip kutulara enjekte edildi ve açık delikler kapatılıp ısı değiştirici üzerinde önceden hazırlana boş kanallara yerleştirildi. Bu bakır kutu yüzeylerine termokupl bağlanarak ısı değiştiricisi çalıştığı zaman bakır yüzeyin ve dolayısıyla içte yer alan FDM'in sıcaklık değişimi izlendi.

Isı değiştiricisinden havayı uygun bir şekilde geçirmek için hazırlanan muhafaza içerisine bu ısı değiştiricisi yerleştirildi ve dış ortamla olan etkileşimini minimum düzeye indirmek adına izolasyon malzemesi ile kaplandı. Sistem hazır hala gelmesiyle birlikte motora bağlantısı yapıldı.

Isı değiştirici sistemimizin çalışma prensibini ise şöyle açıklayabiliriz. Öncelikle olarak normal ortam şartlarında çalışması yapılacaktır yani ortam havası muhafaza içerisindeki FDM'li ısı değiştiricisinden geçerek deney gerçekleştirilecektir. Daha sonra yine yaklaşık aynı ortam şartlarında bu kez su tankına belirlediğimiz sıcaklıklarda su takviyesi yapılarak bu suyun, ısı değiştiricisine eklenen hortumlar ve pompa vasıtasıyla içerisinde dolaşması sağlanacaktır. Böylece dolaşan sıcak su, mevcut enerjisini ısı değiştiricisindeki borulardan geçerken ara kanallara yerleşmiş durumdaki bakır kutulardaki muma verecektir. Zaten bu esnada da mum enerji absorbe ederek ısı

depolayacak, katı haldeki enerjisini yükseltecek ve faz değişim noktasına (sıvılaşmaya) yaklaşacaktır.

Termokulp ile ölçülen yüzey sıcaklığı istenilen değere geldiği anda pompa durdurulup motor çalıştırılacaktır. Motora ilk hava faz değişimi yaşayan bu FDM'li malzemenin üzerinden geçerken kendi sıcaklığını artırıp gidecektir. LabVIEW programı (Şekil 3.3) sayesinde devir sayısı ve tork ise kontrol ünitesinden alınarak kaydedilecektir. Motor çalışması boyunca yakıttaki değişimlerde terazi yardımıyla alınacaktır. Motor çalışması esnasında basınç verileri basınç çevirici ve veri iletişim kartları yardımıyla bilgisayara kaydedilmiş ve yine gerekli sıcaklıklar da ısıl çiftler ve Advantech PCL 818 HG veri iletişim kartı ile kaydedilmiştir. Diğer bir nokta olan egzoz emisyon değerleri de deney süresince sürekli olarak bilgisayarlara kaydedilmiştir.

Deneyler 800 ± 10 d/dak devir sayısında ve ısı değiştiricindeki FDM'lerin yüzey sıcaklıkları sırasıyla 10, 20, 40, 50 ve 60°C olarak devam edilmiştir. Tabi ki yüzey sıcaklıklarının bu değere gelinceye kadar sıcak su tankına ısıtılmış su takviyesi yapılarak suyun dolaşımı sağlanmışır.

Bu değere ek olarak birde ortam şartlarındaki mevcut sıcaklığa göre deney yapılmıştır ve orjinal durum olarak adlandırılmışır.

Tüm deneyler boyunca mevcut çalışma ortamının sıcaklığı ve nem değerleri de kaydedilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Dizel motorların soğukta ilk harekete geçişini kolaylaştırmak ve egzoz emisyon karakteristiklerini iyileştirmek amacıyla faz değiştiren malzemelerin kullanımı önerilmiş ve bu amaçla FDM'li plakalar içeren bir ısı değiştiricisi dizel motoruna eklenerek deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmamızda, sıkıştırma ateşlemeli bir motorda farklı sıcaklıklardaki faz değiştiren maddelerin kullanımı ile yapılan deneylerden elde edilen araştırma bulguları sunulmuş ve tartışılmıştır.

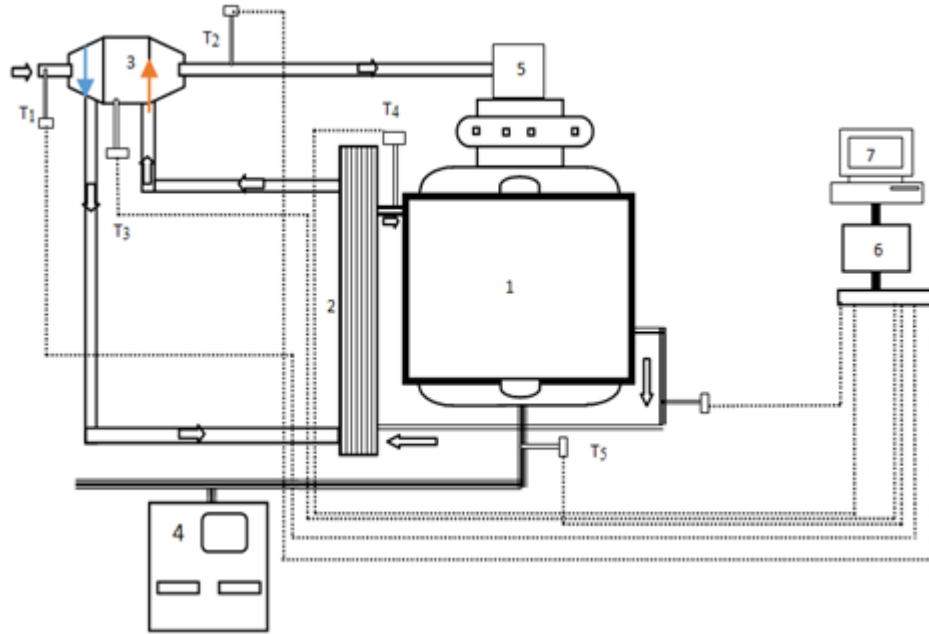
Deneyler, 850 ± 10 d/dak devir sayısında gerçekleştirilmiştir.

Deneysel çalışmamızın temel odak noktası, farklı emme havası sıcaklığında motorun soğuk çalışma davranışı ve egzoz emisyonlarına olan etkisini incelemek. Çalışmada kullanılan FDM'li plakaların enerji depolaması için deney düzeneğine harici bir sistem yani içerisinden sıcak su geçirilen bir ısı değiştiricisi eklenmiştir. Aslında bu prosesin orijinal prensibinde motora ait radyatör soğutucu akışkanının bu sistemde dolaşması yer almaktadır. Aynı koşullarda deney yaparak ilk hareket performansı üzerinde soğuk şartlarda motorun ısınmadan deneylerin yapılması için üretilen düzenek sayesinde artırılan emme havası sıcaklığının etkisini gözlemlemek amacıyla bu harici ısıtma işlemi düşünülmüştür. Böylece sistemdeki ısı değiştiricisinde bulunan su hattından, radyatör bloğunda ısınan su değil harici olarak ısıtılan su geçirilmektedir. Bu sayede farklı sıcaklıklarda emme havası şartları elde edilmiş ve her defasında motor bloğu sıcaklığı sabitlenerek elde edilecek sıcaklık değerlerine eş deneyler yapma imkânı elde edilmiştir.

4.1. Farklı FDM Sıcaklıklarının Motor Sıcaklık Karakteristikleri Üzerine Etkisi

Deneyler ısıtma yapılmamış şartlarda bulunan FDM durumu için ve FDM sıcaklığının 20, 40, 50 ve 60°C seviyeleri olmak üzere toplam 5 farklı şartta gerçekleştirilmiştir.

Sıcaklık ölçümü yapılan noktalar Şekil 4.1’de termo çiftlerle gösterilerek Çizelge 4.1’de ilgili noktaların yerlerinin isimleri verilmiştir.



Şekil 4.1. Deney düzeneğinin şematik görünüşü

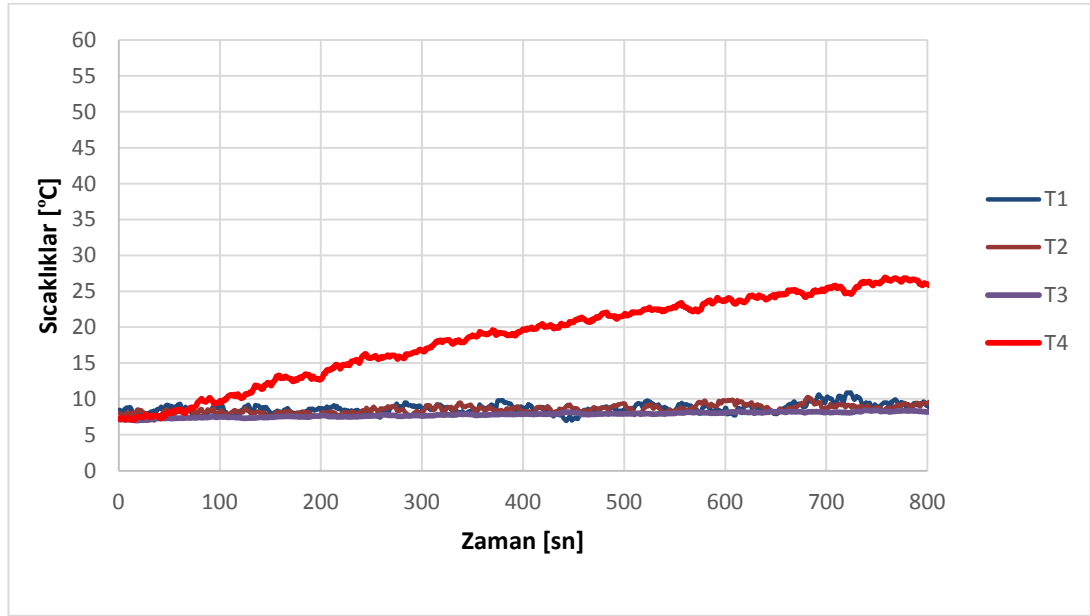
Çizelge 4.1. Deney düzeneğinin numaralandırılması

1- Motor	5- Silindir hava girişi
2- Radyatör	6- Veri iletişim kartı
3- Eşanjör	7- Kişisel bilgisayar
4- Egzoz emisyon cihazı	

Çizelge 4.2. Kullanılan termo çiftlerin yerleri ve isimleri

T_1	Eşanjöre giren hava sıcaklığı
T_2	Eşanjörden çıkan hava sıcaklığı
T_3	FDM'li plaka yüzey sıcaklığı
T_4	Soğutma suyu çıkış sıcaklığı

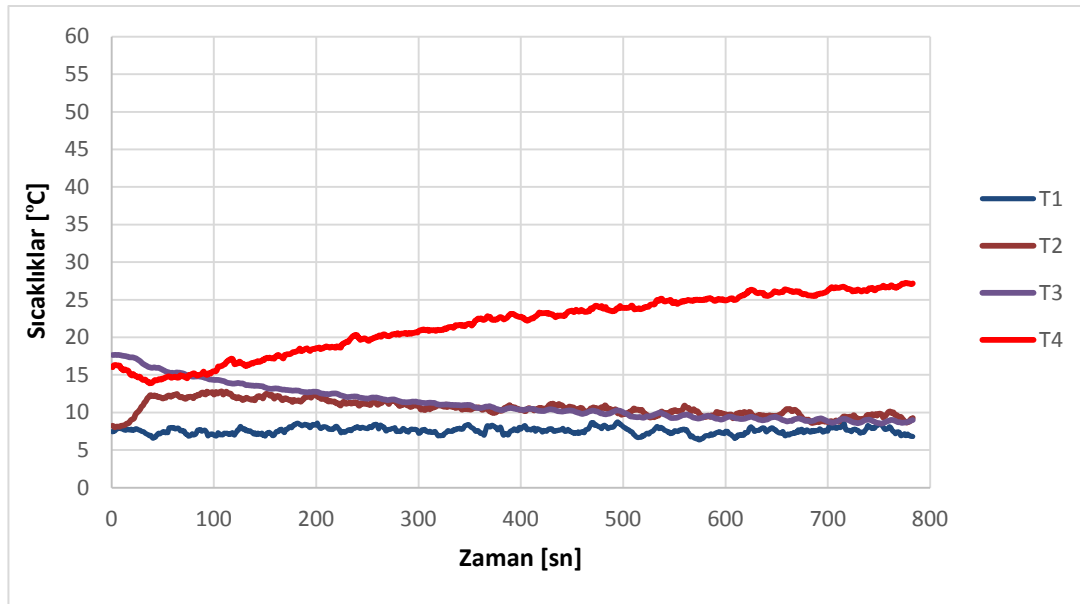
Şekil 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 ve 4.6’da sırası ile FDM’nin ısıtılmadığı durumdaki sıcaklık, 20°C, 40°C, 50°C ve 60°C sıcaklığa sahip FDM kullanımına yönelik yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen motor emme havası sıcaklığını ve çeşitli noktalarda yapılan diğer sıcaklık ölçümlerine ait veriler bulunmaktadır. Deneyler yaklaşık 800 sn boyunca sürdürülerek gerekli veriler kaydedilmiştir.



Şekil 4.2. FDM’nin ısıtılmadığı durumda sıcaklık değişimleri

Şekil 4.2 incelendiğinde deneylerin başlangıç aşaması olan yani çevre havası sıcaklığının yaklaşık 6°C’de kararlı halde iken, ısı değiştiricisine giren hava sıcaklığı (T_1), ısı değiştiricisinden çıkan hava sıcaklığı (T_2), FDM’li plaka yüzey sıcaklığı (T_3) ve soğutma suyu çıkış sıcaklığını (T_4) temsil eden eğriler grafik üzerinde gösterilmektedir. Grafikten anlaşıldığı üzere T_1 , T_2 , T_3 ve T_4 başlangıç değerleri yaklaşık olarak çevre sıcaklığındadır. Burada T_3 değeri, yani FDM’nin sıcaklığı önceden herhangi bir dış müdahale edilmeden sadece çevre sıcaklığında iken kendiliğinden depolamış olduğu iç enerji değerleriyle kullanılmıştır. Motorun çalıştırılmasıyla birlikte doğal olarak eşanjöre giren hava ve çıkan hava değerlerinde değişiklik görülmeyip stabil bir durum sergilenmiştir. Yine aynı şekilde giren havanın etkisinde kalan FDM’li plakanın

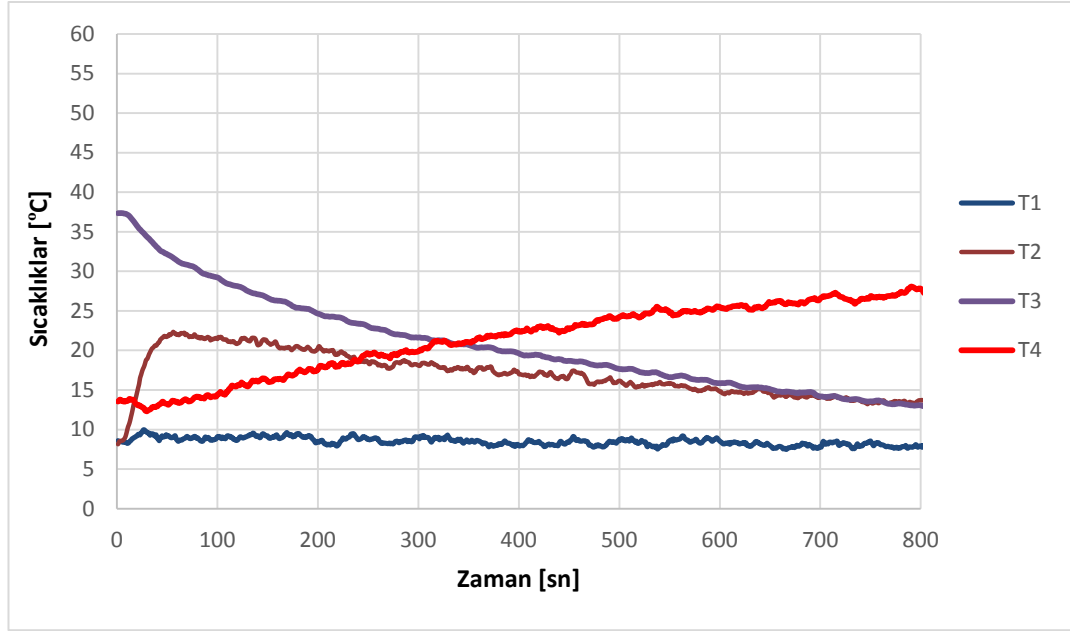
sıcaklığı da aynı oranda dengeli bir şekilde uyum göstermiştir. Soğutma suyu sıcaklığı değerleri ise motorun çalışma süresine paralel olarak, sürekli artan bir eğilime sahiptir.



Şekil 4.3. FDM'nin 20°C olması durumunda sıcaklık değişimleri

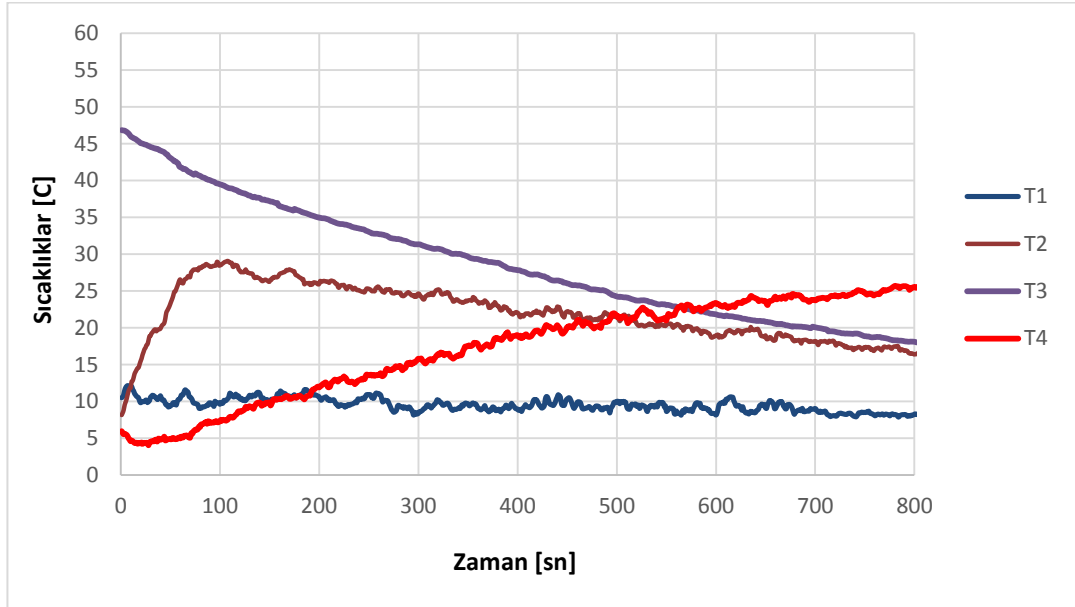
Şekil 4.3’de incelediğimiz grafik, yine aynı şekilde çevre sıcaklığı yaklaşık 6°C’de iken yapılan deneye ait verileri içermektedir. Öncelikli amaç olarak motorun ilk çalışmasının kolaylığına sağlamak adına FDM’nin sıcaklığının 20°C olması durumunda silindir içerisine giren havadaki değişim ve egzoz emisyon değerleri üzerinde nasıl bir davranış sergilediğini gözlemlemektir. Yukarıda bahsedildiği gibi FDM’ ye ısı depolama prosesi blokta ısınan su değil harici olarak ısıtılan suyun geçirilmesiyle sağlanmış olup ve bu ısınmış su sıcaklığının kontrolü manuel olduğu için T₃ sıcaklık değeri yaklaşık olarak 18°C’den başlamıştır. Motorun çalışmasıyla birlikte eşanjöre giren havanın sıcaklık değeri doğal olarak değişmemekle birlikte, giren havanın FDM’li plakalarla etkileşiminin ardından eşanjörü terk eden havanın sıcaklığı yaklaşık ilk 100 sn boyunca hızlı bir artış gösterip zirve noktasına ulaştıktan sonra önce bir müddet stabil olup ardından yavaş ve kararlı bir şekilde azalma etkisi göstermiştir. Bununla birlikte eşanjöre giren taze hava plakalara çarparak plakaların ısınıp ısınıp çektiği için aynı şekilde T₃

sıcaklığında da bir azalmaya neden olmuştur. Motorun çalışmasının akabinde motor soğutma suyunun sıcaklığının sürekli ve artan yönde değiştiğini görebiliriz.



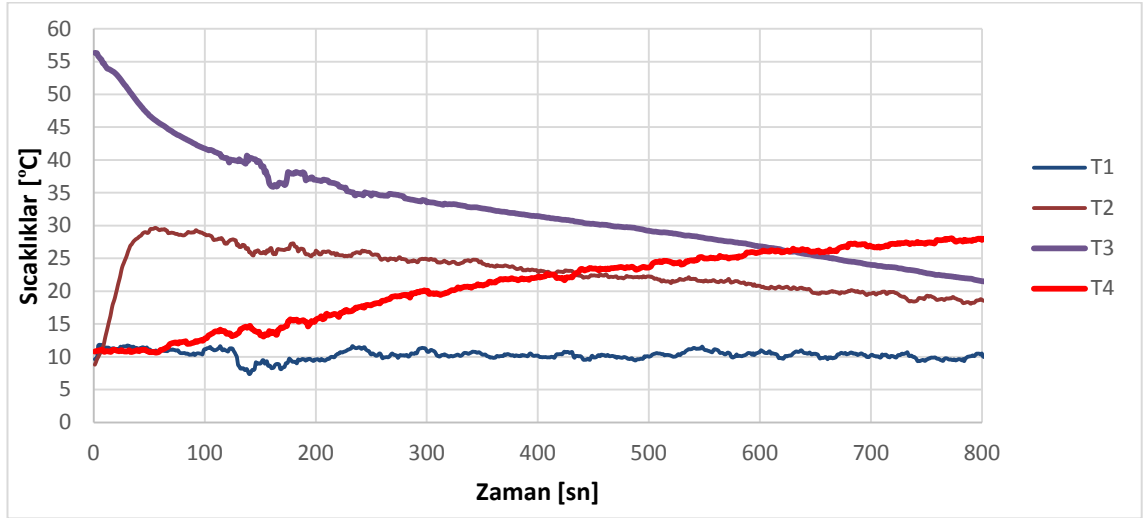
Şekil 4.4. FDM'nin 40°C olması durumunda sıcaklık değişimleri

Şekil 4.4'de bakıldığında, önceki grafikteki gibi başlangıç şartları aynı olup sadece FDM'li plakanın sıcaklığında değişiklik yapılarak 40°C'den başlatılması sağlanmıştır, fakat ısı depolama prosesindeki nedenlerden ve deney düzeneğindeki diğer ayarlamalardan dolayı yaklaşık 38°C olarak başlangıç noktası görülmektedir. Grafikten de anlaşıldığı üzere, eşanjör giriş havası çevre havasında olup sabit bir seyir izlemiştir. Başlangıç olarak zaten eşanjör içerisinde bulunan hava FDM'li plakalarla etkileşim halinde olduğundan dolayı bir miktar ısınmış halde olup, motorun çalışmasıyla beraber ilk bu hava kullanılmaya başlamış ve devamında gelen taze hava plakalara çarpıp ısındıktan sonra motora gitmiştir. Önceki grafikte aynı şekilde eşanjörü terk eden havaya ait T₂ sıcaklık eğrisi yaklaşık ilk 80 sn süresince ani bir artış göstermiş ve daha sonra sürekli akan taze havanın etkisinde kaldığından sıcaklığında azalma başlamıştır. Bu süreç içerisinde de motor soğutma suyu sıcaklığı da beklenildiği gibi sürekli artan yönde değişmiştir.



Şekil 4.5. FDM'nin 50°C olması durumunda sıcaklık değişimleri

Şekil 4.5'te yer alan grafik yorumlanırsa aynı başlangıç şartları prosedürü geçerli olup sadece yine FDM'li plakanın sıcaklığında değişiklik yapılarak 50°C'den başlatılması planlanmış, fakat ısı depolama yönteminden kaynaklı olarak yaklaşık 47°C civarında bir başlangıç ölçüm değeri almış olduğu görülmektedir. Yine aynı şekilde grafikte belirtildiği gibi ısı değiştiricisine giren çevre havası değişimi sabit ilerlemekte olup, eşanjörü terk eden çıkış havası ise yaklaşık ilk 100 sn zaman aralığında dramatik şekilde bir artış gösterip daha sonra beklendiği gibi azalan bir değişim göstermiştir. Şekilde 47°C'den başladığı görülen FDM'li plaka yüzey sıcaklığı da, üzerinden geçen soğuk çevre havasının, yüzeyden ısı çekmesi neticesiyle azalmaya başlamıştır. Bu üç eğrinin azalan davranışına karşıt olarak motorun ısınmasıyla beraber motor bloğunda dolaşan suyun sıcaklığı da artmıştır.



Şekil 4.6. FDM'nin 60°C olması durumunda sıcaklık değişimleri

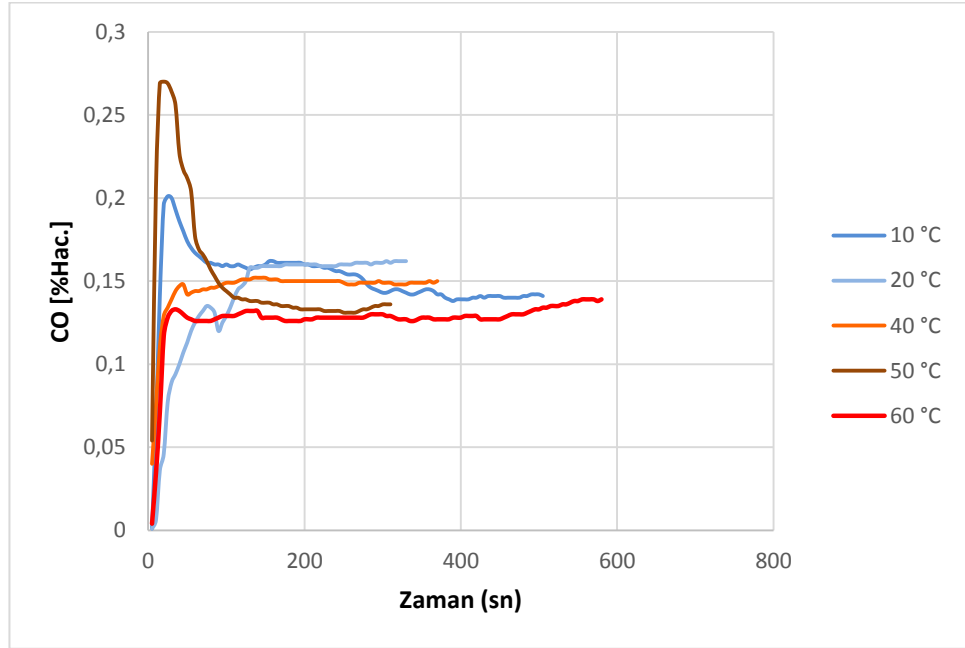
Şekil 4.6'da bize üstte belirttiğimiz yorumlarla eşdeğer olarak aynı cevapları vermiş olup burada da tek farklı başlangıç sıcaklığı değişkenimiz olan FDM'li plakada gerçekleşmiş ve bu kez 60°C olarak planlanan değer, 57°C civarında kalmıştır. Sıcaklık eğrilerinin beklenen davranışları bu deneye ait grafikte de benzer olarak sergilenmiştir. Şekilde görülen sıcaklık eğrilerinde 100-200 sn arasında meydana gelen inişli çıkışlı bölgenin deneyler sırasında kaynaklanan sıcaklık verilerinin kaydedilmesinde oluşan gürültüden veya deney sisteminde oluşan istenmeyen etkilerin neden olduğu düşünülmektedir.

Genel olarak grafiklere bakıldığında, Şekil 4.2'de deneylerin başlangıcında eşanjöre giren hava sıcaklığı, eşanjörden çıkan hava sıcaklığı, FDM'li plaka yüzey sıcaklığı ve soğutma suyu çıkış sıcaklığı daha öncede bahsedildiği gibi yaklaşık 6°C civarında olup motor çalıştırıldıktan sonra soğutma suyu sıcaklığı artmaya başlarken diğer üç sıcaklık sabit kalmıştır. Şekil 4.3-4.6 arasında gösterilen grafiklere değindiğimizde, FDM'li plaka yüzey sıcaklığı 20, 40, 50, 60°C olduğunda emme havası sıcaklığını temsil eden eşanjörden çıkan hava sıcaklığı önemli seviyelerde artış göstermiştir. Grafiklerin tamamında görüldüğü üzere bizim çalışmamızın temel odak noktası olan emme havasının ısıtılma işlemi başarılmış olup motorun ilk 10 dk çalışması boyunca bu giriş hava sıcaklık değerindeki azalma önemsiz olmayacak kadar kontrollü bir şekilde

değişmiştir. Isı değiştiricisini terk eden hava ya da diğer bir ifadeyle marş yapıldığı anda silindirlere gitmek üzere ısınmış halde buluna hava (T_2) yaklaşık 10-20 saniye aralığında sanki giren havanın sıcaklığının soğuk olduğu ve bu zaman aralığında ısınmaya başladığı görülmektedir. Ancak burada görünen durum mevcut deney düzeneğindeki hava gidiş hattının korumasız olduğu ya da direk çevre havasının kolayca etkileyeceği bir yola sahip olduğundan beklenen hava sıcaklık değerlerinde bir sapma görülmektedir. Bu olumsuz durumun önüne tabi ki değişik koruma yolları geliştirilerek geçmek gerekir ya da daha yeni nesil bir motor üzerinde yapılmasıyla beraber daha mükemmeliyetçi sonuçlar elde edilebilir. Bir başka nokta ise, grafiklerde FDM'in sıcaklık eğrisi ve emme havasına ait eğri ilk 10 dk'dan sonra kesişmeye başlamış ve emme havası, bu süre boyunca istediğimiz gibi çevre sıcaklığına göre daha sıcak değerlerde ve daha uzun zaman aralığında silindirlerde kullanılmıştır.. Bu durum hem FDM'lere yüklenen gizli ısının hem de soğutma suyu ve eşanjör katı elemanlarına yüklenen duyulur ısının motor çalıştırıldıktan sonra geri kazanıldığını göstermektedir. Başka bir ifadeyle çalışır haldeki motordan kaybedilen ısı enerjisinin soğutma suyuna transfer edilerek bu vasıta ile atık ısı FDM'li sistemde kullanılmıştır. Deneyler yaklaşık 800 sn boyunca sürdürülmüş ve FDM'li yüzeyin sıcaklığının artmasına paralel olarak eşanjörden çıkan havanın sıcaklığının da arttığı görülmüştür.

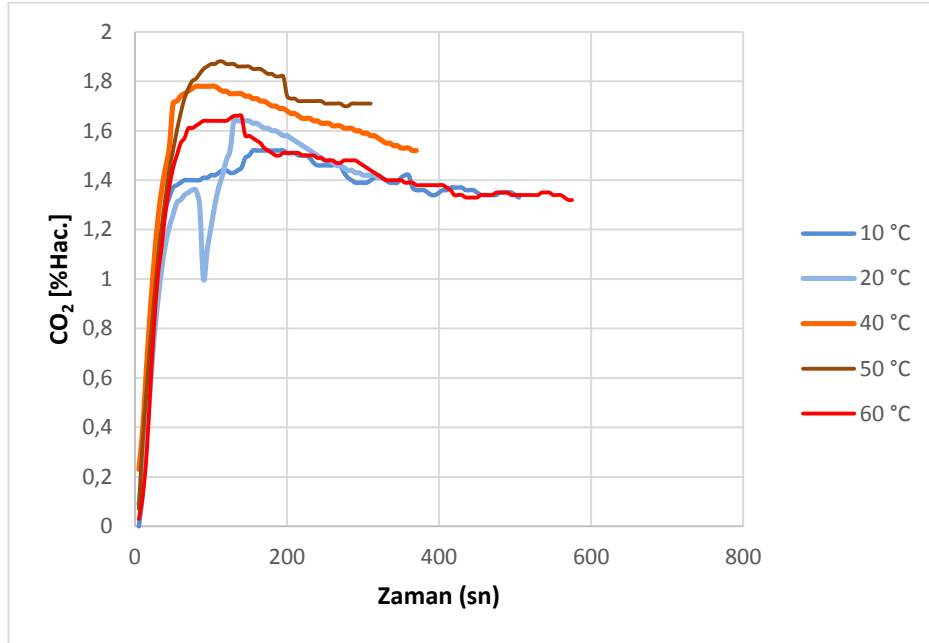
4.2. Farklı FDM Sıcaklıklarının Egzoz Emisyon Karakteristikleri Üzerine Olan Etkisi

Motor egzoz emisyonu ürünlerinden olan CO gazının değişik FDM sıcaklıklarında zamana göre değişimi Şekil 4.7'de yer almaktadır. Grafiğe bakıldığında FDM'li plakaların yüzey sıcaklığı arttığında egzoz emisyonları içerisindeki CO konsantrasyonunun azaldığı ve artan FDM sıcaklığına bağlı olarak emme havası sıcaklığının da artmasıyla silindir içi başlangıç yanma karakteristiklerini olumlu yönde etkilemiştir.



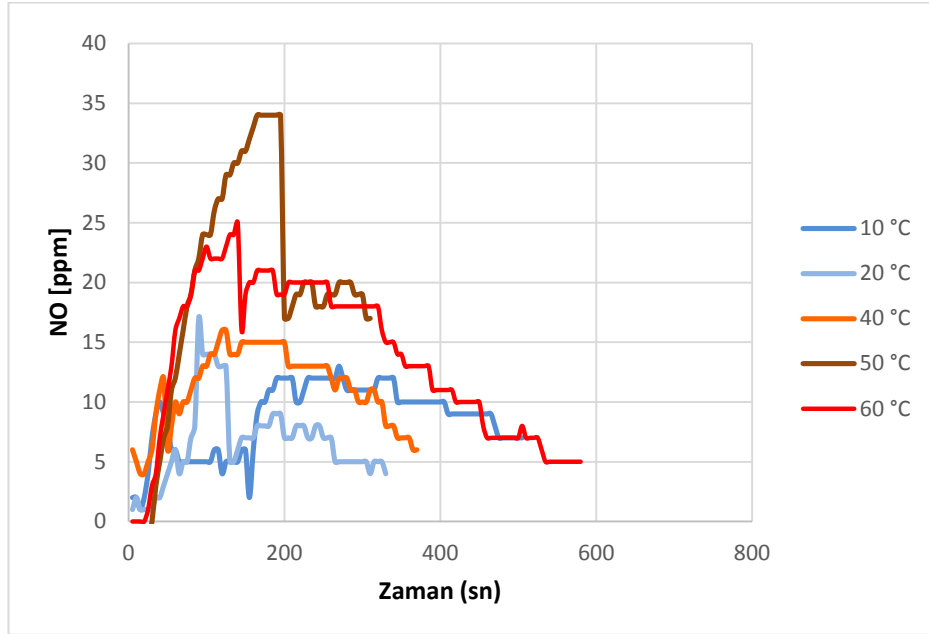
Şekil 4.7. Farklı FDM sıcaklıkları için CO emisyonu değişimi

Şekilde görüldüğü gibi CO emisyonları genel olarak motor ilk çalışmaya başladığı anda maksimum değerlere çıkmakta ve daha sonra süre geçtikçe azalmaktadır. Böylece emme havası sıcaklığı arttığında yanmada bir iyileşme görülmüş ve eksik yanma ürünü olan CO üretimi de dolayısıyla düşmüştür. Literatürde geçen çalışma sonuçlarında CO emisyon oranlarının sıcakta ilk hareket esnasında iki kat daha az üretildiğinin bilgileri yer almaktadır (Bielaczyc *et al.* 2001). Kendi çalışmamıza ait bu grafik yorumunda da artan sıcaklığın CO emisyonuna olumlu yönde katkı sağladığını ifade edebilir ve literatürdeki sonuçlarla uyumlu olduğunu söyleyebiliriz.



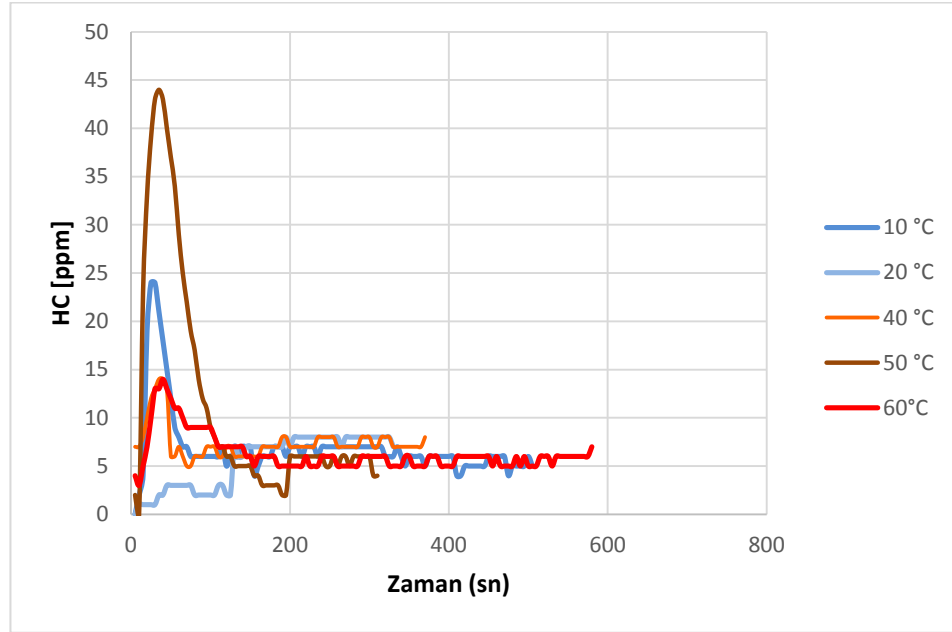
Şekil 4.8. Farklı FDM sıcaklıkları için CO₂ emisyonu değişimi

Şekil 4.8 bize bir diğer emisyon ürünü olan CO₂ gazının zamanla değişimini göstermektedir. 5 farklı sıcaklık değerindeki FDM’li plakalar birbirinden farklı davranış sergilemişlerdir. Başlangıç aşamasından itibaren tüm eğriler, yaklaşık ilk 100 sn boyunca hızlı bir artış göstermiş ve bir maksimum değer ardından azalmaya başlamışlardır. Eğrilerin temsil ettiği sıcaklık değerine bakarak daha fazla sıcaklığı olan FDM’li plaka testinde en fazla CO₂ üretimi olduğu görülmekte ve FDM’li plaka veya diğer bir şekilde emme hava sıcaklığı azaldıkça CO₂ üretimi de azalmıştır. Genel olarak artan emme havası sıcaklığının ilk çalışma sırasında iyileştirmeye neden olduğu için veya yanma kalitesinin daha iyi olmasından ötürü eksik yanma ürünleri azalmış ve tam yanma ürünü olan CO₂ miktarında artışa neden olmuştur. Sonuç olarak, artan emme havası sıcaklığı, egzoz emisyon ürünü olan CO₂ gazının değerinde bir yükselişe sebep olmaktadır.



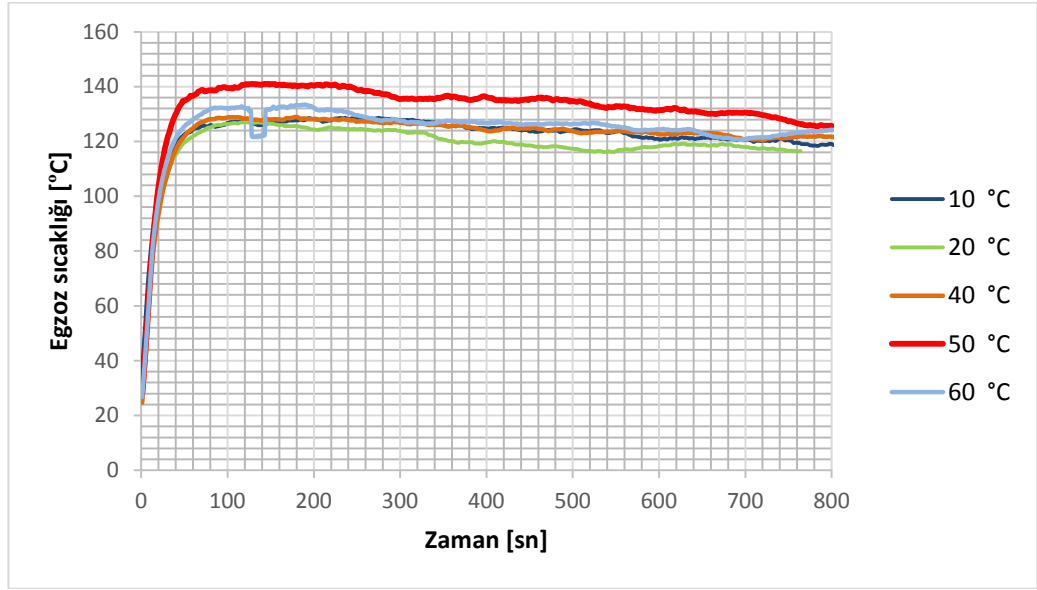
Şekil 4.9. Farklı FDM sıcaklıkları için NO emisyonu değişimi

NO emisyonlarının değişimini veren Şekil 4.9 incelendiğinde motorun ilk çalışmaya başlamasından itibaren belli bir süreye kadar NO emisyonlarının arttığı, daha sonra ise hızlı bir azalmanın ardından hemen hemen sabit kalma davranışı görülmektedir. Sıcaklık eğrileri incelendiğinde emme havası sıcaklığının artırılması, NO emisyon değerinin artmasına yol açmıştır. Tersî durum olarak düşük emme havası sıcaklığında yanma prosesinin sıcaklık seviyesi düşmekte ve NO_x emisyonları azaltmaktadır. Hava sıcaklığındaki bu düşme tutuşma gecikmesinde değişikliklere sebep olabilir. Dolayısıyla yakıt püskürtüldüğünde silindir içindeki sıcaklığının daha fazla olması grafikte de görüldüğü üzere NO emisyonlarının artmasına sebep olmuştur. Broatch *et al.* (2008) uygun emme havası ısıtma sistemleri için NO_x emisyonlarının iyileştirebileceğini belirtmiştir.



Şekil 4.10. Farklı FDM sıcaklıkları için HC emisyonu değişimi

Şekil 4.10’da yer alan grafik farklı FDM sıcaklığından kaynaklı değişen emme havası sıcaklıklarında HC emisyonlarının zamanla değişim bilgisini vermektedir. Motor ilk çalışmaya başladığı andan itibaren HC emisyonlarının artmaya başladığı, bir süre sonra maksimum değer ulaştığı, daha sonra azalmaya başlayıp ve minimum bir değere ulaştıktan sonra sabit bir seyir izlediği görülmektedir. Şekil incelendiğinde motorda çevre havası sıcaklığının artmasının HC emisyonların da azda olsa bir azalmaya neden olduğunu kanıtlanmış olup literatürde de yer alan bir çalışmada HC emisyonlarının sıcakta ilk hareket esnasında çok daha az üretildiği öne sürülmüş (Bielaczyc *et al.* 2001) ve ayrıca uygun emme havası ısıtılma işleminde HC emisyonlarının iyileştirilebileceğine değinilmiştir (Broatch *et al.* 2008). Literatürde yer alan çalışmaların geneline bakıldığında sonuçların çalışmamızla paralellik gösterdiğini söyleyebiliriz.

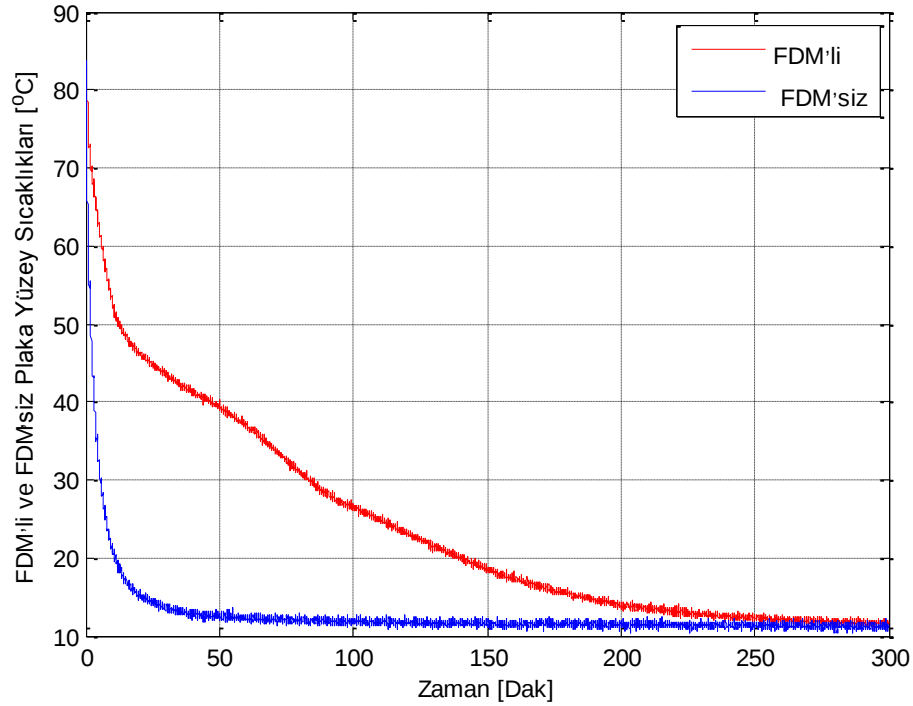


Şekil 4.11. Farklı FDM sıcaklıklarının egzoz gazı sıcaklığına olan etkisi

Şekil 4.11’de farklı FDM sıcaklıklarında yapılan deneyler süresince ölçülen egzoz gazı sıcaklıkları yer almaktadır. Şekilde orijinal motor koşullarında motor ilk çalışmaya başladığı andan itibaren egzoz gazı sıcaklığının hızlı bir şekilde artmaya başladığı, yaklaşık 80 ile 100 saniye sonra maksimum bir değere eriştiği ve bu maksimum değerden sonra kısmen az miktarda bir azalmayla beraber sabit bir sıcaklık eğrisine dönüştüğü görülebilir. Bazı eğrilerde deneysel süreçten kaynaklanabilecek küçük farklılıklar gözlemlense de genel olarak tüm sıcaklık eğrilerinde artan giriş havası (FDM’li plaka) sıcaklığına bağlı olarak artan bir egzoz gazı sıcaklık eğilimi vardır. Bu davranışlar orijinal durumda olan egzoz sıcaklık eğrisi ile benzerdir. Şekilde incelenen sıcaklık eğrileri ile yukarıda gösterilen eşanjöre giren hava sıcaklık (T_2) eğrileri paralellik göstermektedir. Aynı şekilde T_2 sıcaklık eğriside yaklaşık ilk 100 sn boyunca silindirlere giden hava sıcaklığındaki ani artışlar gibi gözlenmiştir. Bunun nedeni eşanjöre giriş yapan havanın, içerideki mevcut FDM sıcaklığını çekerek motora daha yüksek sıcaklıkta girmesi sağlanarak sıkıştırma zamanı sonunda daha yüksek sıcaklık ve basınçlar elde edilmiş ve böylece egzoz zamanı sonunda motor egzozundan çıkan egzoz gazının sıcaklığı yüksek çıkmıştır.

4.3. FDM'li ve FDM'siz Plakaların Yüzey Sıcaklıklarının Zamanla Değişimi

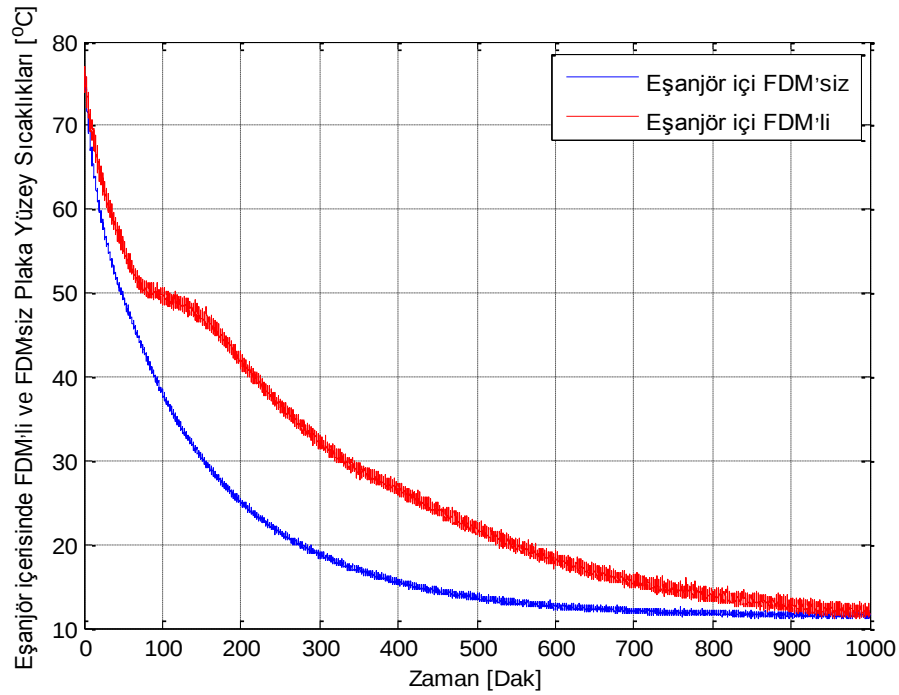
Şekil 4.12 ve 4.13'de gösterilen grafikler sırasıyla FDM'li ve FDM olmayan yani içerisi boş olan plakaların belli bir sıcaklığa çıkarıldıktan sonra normal çevre şartları altında zamanla soğuma değişimini temsil etmektedir.



Şekil 4.12. FDM'li ve FDM'siz plakaların yüzey sıcaklıklarının muhafazasız olarak normal çevre şartlarında soğuma grafiği

Şekil 4.12'de hem FDM'li hem de FDM'siz plakaların yüzey sıcaklıklarının yaklaşık 80°C'ye çıkarıldıktan sonra herhangi bir koruma olmadan doğrudan her iki plakanın da çevre ortamına bırakıldığında sıcaklıklarındaki değişimin nasıl olduğu izlenmiştir. Görüldüğü üzere mavi renkle gösterilen eğri içerisi boş olan plakanın değişimini ve kırmızı ile gösterilen eğri ise içerisinde faz değişen madde buluna plakanın sıcaklık değişimini göstermektedir. Her iki plakada aynı anda soğumaya bırakıldığında FDM'siz olan plakanın sıcaklığı ilerleyen dakikalarda hızlı bir şekilde azalmaktadır. Bu azalma yaklaşık 50 dakikadan sonra plaka sıcaklığının çevre havası sıcaklığına ulaşması ile artık sabit bir değer olarak değişimini sürdürmüştür. Diğer yandan içerisinde FDM

bulunan plaka zamanla daha yavaş bir azalma eğilimi göstermiştir. FDM maddesinin erime sıcaklık bandı olan 45-50°C'ye geldiğinde artık FDM kendi özelliğini iyice göstermeye başlamış ve ısınma süresi boyunca içerisinde depolamış olduğu iç enerjisini bu kez soğuma durumunda ortama geri vererek uzun süre boyunca sıcaklığını korumuştur. Yaklaşık olarak 250 dakika sonra FDM'li plaka sıcaklığı çevre sıcaklığına ulaşmıştır. Buradan da anlaşıldığı üzere FDM maddesi var olan ısı depolama özelliği sayesinde gerekli şartlar sağlandığında mevcut sıcaklığını uzun süreler muhafaza edebilmektedir. İki plakanın soğuma verileri incelendiğinde FDM'li plakanın çevre şartları sıcaklığına erişmesi, boş plakaya göre yaklaşık olarak %500 daha fazla uzun sürmüştür diyebiliriz.



Şekil 4.13. FDM'li ve FDM'siz plakaların yüzey sıcaklıklarının eşanjör içerisinde olması durumunda normal çevre şartlarındaki soğuma grafiği

Şekil 4.13.'deki grafik bize FDM'li ve FDM'siz plakaların eşanjörün içerisine yerleştirilmesi durumunda yüzey sıcaklıklarındaki değişimi açıklamaktadır. Her iki plakada sırasıyla boş ve dolu olacak şekilde eşanjör içerisine yerleştirilmiş ve sıcaklıkları yaklaşık 80°C olduktan sonra çevre ortamında soğumaya bırakılarak

ölçümler kaydedilmiştir. Mavi renk ile gösterilen sıcaklık eğrisi boş plakaya ait olup, sıcaklığı parabolik bir şekilde ilerleyen zamanla azalmıştır. Yaklaşık olarak 520 dakika sonra mevcut plaka sıcaklığı çevre sıcaklığına kavuşmuş ve sabit bir değerle birlikte seyrine devam etmiştir. FDM'li plakaya ait soğuma değişimi ise kırmızı çizgiyle gösterilmiştir. Bu eğride önceki grafiğe benzer şekilde davranmıştır. Plaka sıcaklığı yaklaşık 80°C'den başlamak üzere yaklaşık ilk 80 dakika boyunca azalma ya başlamış olup FDM maddenin erime sıcaklık bandı olan 45-50°C'ye geldiğinde ise bu sıcaklık aralığında yaklaşık 80 dk mevcut faz değişimini yaşamış ve sıcaklığını uzun süre korumaya devam etmiştir. Ardından FDM maddesinin ısınma sürecine depoladığı enerjiyi ısı şeklinde dışarıya vermesiyle birlikte sıcaklık eğrisi zamanla azalma eğilimine girmiştir. Bu azalma eğrisi ise FDM'li plakanın sıcaklığının çevre şartlarına kavuşma başlangıcı olan yaklaşık 1000 dakika kadar sürmüş ve daha sonra sabit şekilde değişimini sürdürmüştür. Tüm bu plaka soğuma eğrilerinden de anlaşıldığı üzere bu süre farkı FDM'in faz değiştikten sonra dahi artan sıcaklıkla birlikte sürekli içerisine depolamış olduğu enerjiden kaynaklanmaktadır. Grafikteki sayısal değerler incelendiğinde FDM'li plakanın çevre şartları sıcaklığına erişmesi, boş plakaya göre yaklaşık olarak 2 kat daha uzun sürmüştür diyebiliriz.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Soğuk şartlar altında dizel motorlarda ilk harekete geçiş esnasında sorunlar yaşandığı ve hatta bu ilk hareket sürecinde egzoz emisyon değerleri bakımından önemli derecede problemler olduğu da bilinmektedir. Bütün bu problemlerin çözümü için çok farklı çözüm araştırmalarıyla değişik iyileştirme yöntemleri üretilmiş ve uygulanmıştır. Daha önceden detaylıca veya maddesel olarak bahsedilen bu değişken tekniklerden bazıları kızdırma bujilerinin kullanılması, ateşleme bujisinin kullanılması, emme havası ısıtma sistemlerinin kullanılması, çoklu enjeksiyon sisteminin geliştirilmesi, egzoz gazı sirkülasyonları, soğutucu akışkan sıcaklığının kullanılması, katalitik konvertörlerin kullanımı, değişik faz değişimine sahip maddelerin kullanımı gibi birçok yöntem sıralanabilir. Tüm bu çözüm sistemlerinin bir kısmı ilk hareket problemini iyileştirmiştir ve egzoz emisyon karakteristikleri üzerine de olumlu etki göstermiştir. Diğer yandan bu çözüm yöntemlerinin beraberinde bazı dezavantajları da getirdiği belirtilmiştir.

Motor deney düzeneğine içerisine FDM'li plakalar eklenen bir eşanjör yerleştirilmiş ve farklı FDM sıcaklıklarında silindirlere giden havanın ilk harekete olan etkisi ve egzoz emisyonu üzerine olan iyileştirmeleri incelenmiştir. Deneyler sırasında farklı noktalardan sıcaklık ölçümleri izlenmiş ve emisyon ürünlerindeki (CO_2 , CO, HC, NO) değişimlerin verileri alınmıştır.

5.1. Sonuçlar

Sıkıştırma ateşlemeli bir motorda soğukta ilk hareketi kolaylaştırmak ve egzoz emisyon karakteristikleri üzerine olan etkiyi incelemek için faz değiştiren malzemelerin kullanımıyla emme havasını ısıtmaya yönelik yapılan deneysel çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilmektedir.

FDM maddelerinin kullanımı ile soğuk çevre şartlarında emme manifoldundan silindirlere daha yüksek sıcaklıklarda hava gönderilmesi mümkün olmuştur.

Bu faz maddelerinin kullanımı bize soğuk şartlarda ilk hareket ile motor kararlı hale gelinceye kadar silindirlerin sıcak emme havası ile besleyebilmeyi sağlamıştır. Diğer bir ifade ile motor emme havası için gereken hava sıcaklığı orijinal çevre havasına göre daha yüksek değerdedir.

Emme havası ısıtma sistemi sayesinde değişen emme havası sıcaklıkları elde edilmiş ve egzoz gaz sıcaklığı artan emme havası sıcaklığıyla doğru orantılı olarak değişmiştir.

Çevre havası sıcaklığındaki artışla birlikte motorun kararlı devir sayısına erişme süresi de kısalmıştır. Diğer yandan bu durumla artan emme havası sıcaklığına paralel olarak bu sürenin daha da azalacağı desteklenmiştir. Bu yöntemle ilk hareket için yapılan marş süreleri de kısalmıştır.

Isı değiştiricinin kullanımıyla beraber HC değerlerinde artış gözlenmiş ancak bu artış kısa zamanda hızlı bir azalma eğilimine dönmüştür. Diğer yandan artan emme havasına bağlı olarak NO değerlerinde artış gözlenmiş olup zamanla sabitleşmeye yönelmiştir.

Tüm çevre sıcaklıklarında CO emisyonlarında azalış meydana gelmiş ve CO emisyonları genel olarak motorun çalışmaya başladığı anda maksimum olmuş daha sonra belli sürede azalmaya başlamıştır. Artan emme havası sıcaklığıyla CO emisyon değerlerinde görülür azalmalar kaydedilmiştir.

FDM'li ısı değiştiricisi sayesinde elde edilen değişik emme havası sıcaklığına bağlı olarak yanmada iyileşmeler oluşmuş ve CO₂ değerlerinde yükselme meydana gelmiştir.

Elde edilen yüksek emme havası sıcaklık değerleri için ısılılık oranında artışlar görülmüştür.

Sonuç olarak emme havası ısıtma sisteminde ana madde olarak FDM maddelerinin kullanımı ile silindir havası sıcaklığının artırılabilirdiği, park sonrasında tekrar hareket

edinceye kadar kullanılan FDM maddesinden sağlanan gizli ısı ile bu süre boyunca sıcak emme havası sağlama imkanı olduğu görülmüş, böylece ilk hareket problemlerinde bir çözüm yöntemi olduğu görülmüştür. Genel olarak soğuk çalışmaya kıyasla egzoz emisyonlarında dikkat çekecek düzeyde iyileşmelerin olduğu, diğer emme havası ısıtma sistemleri gibi ek maliyetlerinin olmadığı, kızdırma bujileri gibi çalışma sırasında motorun yakıtının akış profiline etkisinin olmadığı, ek enerjiyi gerek olmadığı, motorun artık ısısından beslenen soğutma suyu sayesinde tükenen FDM enerjisinin bu şekilde defalarca yapısında bozulmalar olmadan geri kazandığı vurgulanmaktadır. Ayrıca motora ilk hareketi kazandırma sürecinde marş süresinin kısılması ve böylece genel olarak yanmamış egzoz emisyonlarında azalmaların olduğu anlaşılmıştır.

5.2. Öneriler

Bu çalışmada kullanılmak isten FDM maddesi sayesinde motor üzerinde ciddi değişiklikler teşkil etmeden tasarlanan bir ısı değiştiricisi ile dizel motorların soğuk çevre şartlarında, ilk hareket esnasında ortaya çıkan problemlerin çözümü için uygun, maliyeti az olan ve motor aksamında fazla bir değişiklik yapılmadan uygulanabilecek bir çözüm yöntemi olduğu görülmüştür. Ancak etkin bir yöntem olmasına rağmen kısa ömürlü yani kısa zamanlı bir çözüm olduğu söylenmelidir.

Yapılan bu çalışmada beklenen cevaplar alınmıştır ancak bu çalışmanın daha verimli ve daha etkin sonuçlar vermesi adına bazı öneriler verilebilir.

Öncelikle motorun emme havası kontrol altına alınarak ya da ısı değiştiricisi üzerinde bir kontrol sisteminin eklenmesi ile daha optimum sonuçlar elde edilebilir.

Silindirlere gönderilen sıcak havanın sıcaklık değerine çevrenin en az etki etmesi için bu emme havası yolunu kontrol altına alma yoluna gidilebilir.

Sistemde kullanılan ısı değiştiricisi boyutları üzerinde çeşitli değişiklikler yapılarak motor için optimum emme havası geçişini sağlaması, giren sıcak havanın en etkin şekilde korunmasına yönelik yeni tasarımlar uygulanabilir.

Isı değiştiricisinde kullanılan FDM maddesi için tek bir maddeden ziyade uygun bir erime bandına sahip değişik FDM maddeleri kullanarak en uygun faz değişim maddesi seçilebilir.

FDM maddesini depolayan bakır plakaların optimum boyutlandırma çalışmaları yapılabilir.

Gerekli sistemin üretimi esnasında ekonomik analizi yapılarak ticari bir ürün olma ve herkes tarafında kullanılacak bir imkân olup olmadığı incelebilir ve dahası patent alınabilir.

Tasarlanan ısı değiştiricisi boyutu, kullanım kolaylığı, problemin çözümüne yönelik etkinliği ve motor üzerine kolay uygulama yapılmasına uygun olarak yenilendikten sonra mevcut araçların tamamında kullanılması için uygun bir hale getirilebilir.

KAYNAKLAR

- Anonymous, 2013. <http://www.dieselnet.com/standards/eu/ld.php>. 20/12/2013.
- Abhat, A., 1983. Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage Materials, *Solar Energy*, 30,(4), 313-332.
- Anisur, M.R., Mahfuz, M.H., Kibria, M.A., Saidur, R., Metselaar, İ.H.S.C., Mahlia, T.M.İ, 2013. Curbing global warming with phase change materials for energy storage, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 23-30.
- Bielaczyc, P., Merksiz, J., Pielecha, J., 2001. Investigation of exhaust emissions from DI diesel engine during cold and warm start. SAE Technical Paper No: 01-1260.
- Broatch, A., Lujan, J. M., Serrano, J. R., Pla, B., 2008. A procedure to reduce pollutant gases from diesel combustion during European MVEG –A cycle by using electrical intake air-heaters. *Fuel*, (87), 2760–2778.
- Broatch, A., Ruiz, S., Margot, X., Gil, A., 2010. Methodology to estimate the threshold in-cylinder temperature for self-ignition of fuel during cold start of diesel engines, *Energy* 35, 2251-2260.
- Burch, S.D. and Biel, J.P, 1996. SULEV and "Off-Cycle" Emissions Benefits of a Vacuum-Insulated Catalytic Converter. SAE Technical Paper No: 96-01-0461.
- Büyükbiçakçı, E., 2006. Faz Değiştiren malzeme (PCM) Kullanılarak Transformatörlerin Soğutulması. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Çelik, A., Ceviz, M. A., Yılmaz, M., Çomaklı, K., 2011. Dizel motorlarında ilk harekete geçiş süresince silindiriçi değişimler, ULIBTK'11 18. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, 07-10 Eylül 2011, Zonguldak.
- Çelik, A., 2012. Dizel Motorlarda Soğukta İlk Harekete Geçiş Kolaylaştırmak Ve Emisyon Karakteristiklerinin İyileştirmek İçin Vorteks Tüplerin Kullanılması. Doktora Tezi, Erzurum Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Çelik, A., Ceviz, M. A., Yılmaz, M., Öner, İ.V., Karagöz, S., 2013. Effects of using vortex tubes on events during cold start of a direct injection diesel engine. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* ,5, 021411.
- Demirbaş, M.F., 2006. Thermal Energy Storage and Phase Change Materials: An Overview. *Energy Sources, Part B*, 1, 85–95.
- Desantes, J. M., Garcia-OLiver, J. M., Pastor, J. M., Ramirez-Hernandez, J. G., 2011. Influence of nozzle geometry on ignition and combustion for high-speed direct injection diesel engines under cold start conditions. *Fuel* (2011) , doi: 10.1016/J.fuel . 2011.06.006.
- Farid, M.M., Khudhair, A.M, Razack, S.A.K., Hallaj, S.A., 2004. A review on phase change energy storage: materials and applications, *energy Conversion and Management*, 45,1597-1615.
- Ferguson, C.R., Kirkpatrick, A.T., 2001. *Internal Combustion Engines*. Wiley, 369, Amerika.
- Gümüş, M., Kılıçaslan, E. ve Binark, A. K., 2003. Application of Phase Change Materials to Pre-Heating of Internal Combustion Engines, *Proceedings of the 3rd International Advanced Technologies Symposium*, Gazi University,1, 425-436, Ankara.

- Gümüş, M., 2009. Reducing cold-start emission from internal combustion engines by means of thermal energy storage system, *Appl. Therm. Eng.*, 29, 652–660.
- Gümüş, M. and Uğurlu, A., 2011. Application of phase change materials to pre-heating of evaporator and pressure regulator of a gaseous sequential injection system. *Applied Energy*, 88, 4803–4810.
- Henein, N. A., Zahdeh, A. R., Yassine, M. K., Bryzik, W., 1992. Diesel engine cold starting combustion instability. SAE Technical Paper No: 920005.
- Henein, N. A., 1997. Autoignition and Combustion in Diesel Engines Under Cold Starting Conditions. Center for Automotive Research Detroit, MI 48202, Rapor.
- Henein, N. A. And Tagomori, M.K., 1999. Cold-start hydrocarbon emissions in port-injected gasoline engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 25, 563–593.
- Heywood, J.B., 1988. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill Book Co., 930, Singapore.
- Korin, E., Reshef, R., Tsernichovesky, D., Sher, E., 1998. Improving cold-start functioning of catalytic converters by using phase-change materials. SAE Technical Paper No: 1998-06-71.
- Liu, H. Q., Henein, N. A., Brygik, W., 2003. Simulation of diesel engines cold-start. SAE Technical Paper No: 2003-01-0080.
- Mohr, H., and Urlaub, A., 1994. Improvement of the cold start qualities of diesel engines with swirl chambers. SAE Technical Paper No: 940075.
- Ogawa, H., Raihan, K. A., Ilizuka K.-İ., Miyamoto, N., 1999. Cycle-to-cycle transient characteristics of diesel emissions during starting. SAE paper 1999-01-3495.
- Osuka, I., Nishimura, M., Tanaka, Y., Miyaki, M., 1994. Benefits of new fuel injection system technology on cold startability of diesel engines improvements on cold startability and white smoke reduction by means of multi injection with common rail fuel system (ECD-U2). SAE paper 940586.
- Pandiyarajan, V., Chinnappandia, M., Raghavan, V., Velraj, R., 2011. Second law analysis of a diesel engine waste heat recovery with a combined sensible and latent heat storage system. *Energy Policy*, 39, 6011–6020.
- Pastor, J. V., Garcia-Oliver, J. M., Pastor, J. M., Ramirez-Hernandez, J.G., 2011. Ignition and combustion development for high speed direct injection diesel engines under low temperature cold start conditions, *Fuel* 90, 1556-1566.
- Pulkrabek, W.W., 2003. *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*. New Jersey: Prentice Hall.
- Rathod, M.K., Banerjee, J., 2013. Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage system: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 246-258.
- Safgönül, B., Ergeneman, M., Ars-lan, H.E. ve Soruşbay, C., 2008. Birsen, 217, İstanbul.
- Schatz, O., 1992. Cold Start Improvement by use of Latent Heat Stores. SAE Technical Paper No: 921605.
- Sharma, A., Tyagi, V.V., Chen, C.R., Buddhi, D., 2009. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 318-345.
- Sharma, A. and Sagara, K., 2005. Latent heat storage materials and systems: A review, *International Journal of Green Energy*, 2, 1-56.

- Türkiye İstatistik Kurumu, 2011-2013. Motorlu Kara Taşıtları İstatistikleri (Rapor).
- Uğurlu, A., 2008. Taşıt lpg dönüşüm regülatörlerindeki soğuk çalıştırma probleminin çözümünde faz değıştiren malzemelerin (pcm) uygulaması. Yüksek Lisans Tezi , Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Vasiliev, L.L., Burak, V.S., Kulakov, A.G., Mishkinis, D.A., Bohan, P.V., 1999. Heat storage device for pre-heating internal combustion engines at start-up. *Int. J. Therm. Sci.* (1999) 38, 98-104.
- Vasiliev, L.L., Burak, V.S., Kulakov, A.G., Mishkinis, D.A., Bohan, P.V., 2000. Latent heat storage modules for preheating internal combustion engines: application to a bus petrol engine, *Appl. Therm. Eng.* 20 (2000) 913–923.
- Yardım, M.H., 2012. Motor Teknolojisi. Nobel, 393, Ankara.
- Zahdeh, A. R., Henein, N. A., Bryzik, W., 1990. Diesel cold starting: Actual cycle analysis under border-line conditions. SAE Technical Paper No: 900441.

ÖZGEÇMİŞ

1988’de Erzurum’da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Erzurum’daki farklı okullarda tamamladı. Lise öğrenimini Erzurum Atatürk Lisesi’nde tamamladı. 2007 yılında girdiği Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü’nden 2011 yılında mezun oldu ve yine aynı yıl Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Enerji Bilim Dalında Yüksek Lisans eğitime başladı.

2012 yılı Eylül ayında Ardahan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı ve aynı yıl Ankara Üniversitesi’ndeki hazırlık eğitiminden sonra 2013 yılı temmuz ayından itibaren bu görevini Atatürk Üniversitesi bünyesinde yürütmektedir.

İngilizce bilmektedir.