

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ATIK PALMIYE YAĞINDAN ÜRETİLEN BİYODİZELİN  
MOTOR PERFORMANS VE EMİSYON KARAKTERLERİ  
ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Ahmet Necati ÖZSEZEN**

**Anabilim Dalı: Makina Eğitimi**

**Danışman: Doç.Dr. Mustafa ÇANAKÇI**

**KOCAELİ, 2007**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ATIK PALMIYE YAĞINDAN ÜRETİLEN BİYODİZELİN  
MOTOR PERFORMANS VE EMİSYON KARAKTERLERİ  
ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Ahmet Necati ÖZSEZEN**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 26 Şubat 2007**

**Tezin Savunulduğu Tarih: 21 Mart 2007**

**Tez Danışmanı**

**Doç.Dr. Mustafa ÇANAKÇI**

(.....)

**Üye**

**Prof.Dr. İbrahim KILIÇASLAN**

(.....)

**Üye**

**Prof.Dr. Osman İSİKAN**

(.....)

**Üye**

**Prof.Dr. Halil İbrahim SABAC**

(.....)

**Üye**

**Doç.Dr. Mehmet UÇAR**

(.....)

**KOCAELİ, 2007**

## **ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR**

Dizel motorların endüstride ve taşıtlarda kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Dizel motorların geleceği, enerji kaynağı olarak kullanılan yakıtların sürdürülebilirliğine ve çevresel açıdan kabul edilebilir emisyon üretmesine bağlıdır. Enerji kaynağı olarak petrol ve türevlerini kullanan bu motorlar için petrolün sınırlı bir kaynak olması nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarının alternatif yakıt olarak kullanılabilirliği ile ilgili çalışmalar sürmektedir. Alternatif yakıt olarak isimlendirilen bu yakıtlar, genel olarak petrol kökenli yakıtların dışında kalan doğalgaz, bitkisel kökenli yağlar ve alkollerden oluşmaktadır. Bitkisel yağların ayrıştırılması sonucunda elde edilen ester, biyodizel olarak tanımlanmakta ve dizel motorlarda konstrüksiyon açısından herhangi bir değişiklik yapılmadan direkt olarak kullanılabilir. Dizel motorlarda biyodizel kullanımı ile petrol kökenli dizel yakıtına göre daha az egzoz emisyonu üretilerek bu motorlardan kaynaklanan çevresel problemler iyileştirilmektedir. Ayrıca biyodizel biyolojik olarak çok hızlı parçalanabilmekte ve enerjinin sürdürülebilirliğine katkıda bulunmaktadır.

Bu doktora çalışmasında, atık palmiye yağından üretilen biyodizel, ön yanma odalı bir dizel motorda test edilerek motor performans ve emisyon karakterleri üzerine etkisi incelenmiştir. Deneyler Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yakıt ve Motor Test Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Bu tezin ortaya çıkmasında, en başta saygı değer danışman hocam Doç.Dr. Mustafa ÇANAKÇI'ya, bölüm başkanımız Prof.Dr. İbrahim KILIÇASLAN'a, sayın hocalarım Prof.Dr. Halil İbrahim SARAÇ, Doç.Dr. Mehmet UÇAR, Yrd.Doç.Dr. Cenk SAYIN'a, bölümümüzdeki diğer hocalarıma, çalışma arkadaşım Arş.Gör. Ali TÜRKCAN'a ve bölümümüzdeki diğer arkadaşlarıma, Teknik Eğitim Fakültesi yöneticilerine katkılarından dolayı çok teşekkür ederim. Ayrıca, bu doktora çalışmasına manevi katkılarından dolayı eşim Elif ve kızım Zeynep'e çok teşekkür ederim.

Ahmet Necati ÖZSEZEN

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
TABLolar DİZİNİ .....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	x
ÖZET .....	xii
ABSTRACT .....	xiii
1. GİRİŞ .....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....	6
3. ATIK BİTKİSEL YAĞDAN BİYODİZEL (METİL ESTER) ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİN BELİRLENMESİ .....	15
3.1. Biyodizel Üretiminde Reaksiyon Mekanizması.....	17
3.2. Biyodizel Üretimine Etki Eden Temel Faktörler .....	18
3.3. Atık Bitkisel Yağın Biyodizele Dönüştürülmesinde Proses Adımlarının Belirlenmesi .....	21
3.4. Atık Bitkisel Yağın Küçük Ölçekli Olarak Metil Esterine Dönüştürülmesi .....	24
3.5. Atık Bitkisel Yağın Büyük Ölçekli Olarak Metil Esterine Dönüştürülmesi .....	28
3.6. Motor DeneYlerinde Kullanılacak Yakıtların Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri .....	32
3.7. Biyodizelin İnsan Sağlığı Üzerine Etkisi (Toksik Etkisi):.....	35
3.8. Otomotiv Firmalarının Biyodizel Kullanımı ile ilgili Garantileri.....	35
4. DENEYSEL METARYEL VE METOTLAR .....	37
4.1. Deney Materyalleri ve DüzenegİN Hazırlanması .....	37
4.2. Deneysel Hazırlık ve DeneYler .....	41
4.3. Deney Verileri ile Hesaplanan Performans Değerleri.....	42
4.3.1. Döndürme momentinin ölçülmesi.....	42
4.3.2. Efektif gücün hesaplanması .....	43
4.3.3. Ortalama efektif basıncının hesaplanması .....	44
4.3.4. Efektif özgül yakıt tüketiminin hesaplanması.....	45
4.3.5. Hava debisinin hesaplanması .....	46
4.3.6. Hava/Yakıt oranının hesaplanması .....	48
4.3.7. Volümetrik verim .....	48
4.3.8. Termik verim.....	49
4.3.9. Sıcaklıkların ölçülmesi.....	49
4.3.10. Silindir ve yakıt hattı basınçlarının hesaplanması.....	50
4.4. Performans Verilerinin Analizi .....	50
4.4.1. Dizel motorlarda yanma .....	51
4.4.2. Silindir basınç verilerinin ve tutuşma gecikmesinin analizi .....	52
4.4.3. Isı dağılımının analizi ve filtreleme .....	54
4.5. Egzoz Emisyon Verilerinin Analizi .....	57

4.5.1 Egzoz emisyon standartları .....	58
4.5.2. CO emisyonları .....	60
4.5.3. NO <sub>x</sub> emisyonları.....	61
4.5.4. Yanmamış HC emisyonları.....	63
4.5.5. Duman koyuluğu.....	63
5. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	64
5.1. Tam Yük Motor Test Sonuçlarının Analizi .....	64
5.1.1. Performans karakterlerinin karşılaştırılması .....	64
5.1.1.1. Döndürme momenti ve özgül yakıt tüketiminin karşılaştırılması.....	64
5.1.1.2. Efektif gücün ve termik verimin karşılaştırılması.....	66
5.1.1.3. Egzoz gazı sıcaklıklarının karşılaştırılması.....	67
5.1.2. Yanma ve püskürtme karakterlerinin karşılaştırılması .....	68
5.1.2.1. Silindir gaz basınçlarının karşılaştırılması.....	68
5.1.2.2. Isı dağılımlarının karşılaştırılması.....	71
5.1.2.3. Yakıt hattı basınçlarının ve tutuşma gecikmesinin karşılaştırılması.....	73
5.1.3. Egzoz emisyon karakterlerinin karşılaştırılması .....	78
5.1.3.1. CO emisyonlarının karşılaştırılması.....	78
5.1.3.2. CO <sub>2</sub> emisyonlarının karşılaştırılması .....	80
5.1.3.3. NO <sub>x</sub> emisyonlarının karşılaştırılması .....	81
5.1.3.4. HC emisyonlarının karşılaştırılması.....	82
5.1.3.5. Duman koyuluğunun karşılaştırılması .....	84
5.2. 60 Nm Sabit Yükte Motor Test Sonuçlarının Analizi.....	85
5.2.1. Performans karakterlerinin karşılaştırılması .....	85
5.2.1.1. Özgül yakıt tüketiminin karşılaştırılması .....	85
5.2.1.2. Termik verimin karşılaştırılması .....	87
5.2.1.3. Egzoz gazı sıcaklıklarının karşılaştırılması.....	88
5.2.2. Yanma ve püskürtme karakterlerinin karşılaştırılması .....	89
5.2.2.1. Silindir gaz basınçlarının karşılaştırılması .....	89
5.2.2.2. Isı dağılımlarının karşılaştırılması.....	91
5.2.2.3. Yakıt hattı basınçlarının ve tutuşma gecikmesinin karşılaştırılması.....	94
5.2.3. Egzoz emisyon karakterlerinin karşılaştırılması .....	98
5.2.3.1. CO emisyonlarının karşılaştırılması.....	98
5.2.3.2. CO <sub>2</sub> emisyonlarının karşılaştırılması .....	100
5.2.3.3. NO <sub>x</sub> emisyonlarının karşılaştırılması .....	101
5.2.3.4. HC emisyonlarının karşılaştırılması.....	102
5.2.3.5. Duman koyuluğunun karşılaştırılması .....	103
5.3. 40 Nm Sabit Yükte Motor Test Sonuçlarının Analizi.....	104
5.3.1. Performans karakterlerinin karşılaştırılması .....	104
5.3.1.1. Özgül yakıt tüketiminin karşılaştırılması .....	104
5.3.1.2. Termik verimin karşılaştırılması .....	105
5.3.1.3. Egzoz gazı sıcaklıklarının karşılaştırılması.....	106
5.3.2. Yanma ve püskürtme karakterlerinin karşılaştırılması .....	107
5.3.2.1. Silindir gaz basınçlarının karşılaştırılması.....	107
5.3.2.2. Isı dağılımlarının karşılaştırılması.....	110
5.3.2.3. Yakıt hattı basınçlarının ve tutuşma gecikmesinin karşılaştırılması.....	112
5.3.3. Egzoz emisyon karakterlerinin karşılaştırılması .....	116

5.3.3.1. CO emisyonlarının karşılaştırılması.....	116
5.3.3.2. CO <sub>2</sub> emisyonlarının karşılaştırılması .....	118
5.3.3.3. NO <sub>x</sub> emisyonlarının karşılaştırılması .....	118
5.3.3.4. HC emisyonlarının karşılaştırılması.....	120
5.3.3.5. Duman koyuluğunun karşılaştırılması .....	121
5.4. 20 Nm Sabit Yükte Motor Test Sonuçlarının Analizi.....	122
5.4.1. Performans karakterlerinin karşılaştırılması .....	122
5.4.1.1. Özgül yakıt tüketiminin karşılaştırılması .....	122
5.4.1.2. Termik verimin karşılaştırılması .....	123
5.4.1.3. Egzoz gazı sıcaklıklarının karşılaştırılması.....	123
5.4.2. Yanma ve püskürtme karakterlerinin karşılaştırılması .....	124
5.4.2.1. Silindir gaz basınçlarının karşılaştırılması .....	124
5.4.2.2. Isı dağılımlarının karşılaştırılması.....	127
5.4.2.3. Yakıt hattı basınçlarının ve tutuşma gecikmesinin karşılaştırılması .....	129
5.4.3. Egzoz emisyon karakterlerinin karşılaştırılması .....	133
5.4.3.1. CO emisyonlarının karşılaştırılması.....	133
5.4.3.2. CO <sub>2</sub> emisyonlarının karşılaştırılması .....	135
5.4.3.3. NO <sub>x</sub> emisyonlarının karşılaştırılması .....	136
5.4.3.4. HC emisyonlarının karşılaştırılması.....	137
5.4.3.5. Duman koyuluğunun karşılaştırılması .....	138
5.5. Sonuç ve Değerlendirme .....	139
KAYNAKLAR .....	146
EK-A AOCS Official Method CD 3A-63.....	155
EK-B Basınç Algılayıcılarına Ait Teknik Özellikler .....	157
EK-C Yük Hücresi Kalibrasyonu Eğrisi .....	158
EK-D Dijital Sıcaklık Ölçerlere Ait Kalibrasyon Eğrileri .....	160
EK-E Örnek Test Çizelgeleri .....	161
ÖZGEÇMİŞ .....	166

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1: Transesterifikasyon Reaksiyonu .....	17
Şekil 3.2: Atık bitkisel yağın metil esterine dönüştürülmesinde proses akış şeması .....	23
Şekil 3.3: Büyük ölçekli proseste kullanılan sıcaklık kontrol elemanları .....	29
Şekil 3.4: Büyük ölçekli proseste kullanılan karıştırma ve kontrol elemanları .....	29
Şekil 3.5: Büyük ölçekli prosesin ana reaksiyon tankı ve kontrol paneli .....	30
Şekil 3.6: Büyük ölçekli proses şeması.....	31
Şekil 3.7: Ham madde olarak kullanılan atık palmye yağı ve üretilen biyodizel .....	32
Şekil 4.1: Basınç algılayıcılarının motor üzerindeki yeri.....	38
Şekil 4.2: Deney tesisatı.....	39
Şekil 4.4: Deneylede kullanılan yakıtlar ve ham madde olarak kullanılan yağ.....	42
Şekil 4.5: Test düzeneğinde döndürme momentinin ölçülmesi .....	43
Şekil 4.6: Test düzeneğinde yakıt tüketiminin ölçülmesi .....	45
Şekil 4.7: Hava debisi ölçüm şeması .....	46
Şekil 4.8: Dizel motorlarda yanma safhaları.....	51
Şekil 4.9: Yakıt hattı basınç grafiği.....	53
Şekil 4.10: Silindir basınç grafiği .....	54
Şekil 4.11: Isı dağılımı grafiği .....	57
Şekil 4.12: Test motorunun egzoz sistemindeki emisyon ölçüm noktaları.....	58
Şekil 5.1: Tam yük ve değişik devirlerde döndürme momenti ve özgül yakıt tüketimi değişimi .....	64
Şekil 5.2: Tam yük ve değişik devirlerde efektif güç değişimi.....	66
Şekil 5.3: Tam yük ve değişik devirlerde termik verimin değişimi.....	67
Şekil 5.4: Tam yük ve değişik devirlerde egzoz gaz sıcaklıklarının değişimi .....	68
Şekil 5.5: Tam yük ve 1000 d/d'da silindir gaz basıncının KA'ya göre değişimi .....	69
Şekil 5.6: Tam yük ve 1500 d/d'da silindir gaz basıncının KA'ya göre değişimi .....	70
Şekil 5.7: Tam yük ve 2000 d/d'da silindir gaz basıncının KA'ya göre değişimi .....	70
Şekil 5.8: Tam yük ve 2500 d/d'da silindir gaz basıncının KA'ya göre değişimi .....	70
Şekil 5.9: Tam yük ve 3000 d/d'da silindir gaz basıncının KA'ya göre değişimi .....	71
Şekil 5.10: Tam yük ve 1000 d/d'da ısı dağılımının KA'ya göre değişimi .....	72
Şekil 5.11: Tam yük ve 1500 d/d'da ısı dağılımının KA'ya göre değişimi .....	72
Şekil 5.12: Tam yük ve 2000 d/d'da ısı dağılımının KA'ya göre değişimi .....	72
Şekil 5.13: Tam yük ve 2500 d/d'da ısı dağılımının KA'ya göre değişimi .....	73
Şekil 5.14: Tam yük ve 3000 d/d'da ısı dağılımının KA'ya göre değişimi .....	73
Şekil 5.15: Tam yük ve 1000 d/d'da yakıt hattı basıncının KA'ya göre değişimi.....	74
Şekil 5.16: Tam yük ve 1500 d/d'da yakıt hattı basıncının KA'ya göre değişimi.....	75
Şekil 5.17: Tam yük ve 2000 d/d'da yakıt hattı basıncının KA'ya göre değişimi.....	75
Şekil 5.18: Tam yük ve 2500 d/d'da yakıt hattı basıncının KA'ya göre değişimi.....	75
Şekil 5.19: Tam yük ve 3000 d/d'da yakıt hattı basıncının KA'ya göre değişimi.....	76
Şekil 5.20: Tam yük ve değişik devirlerde karbon monoksit (CO) yüzdesinin değişimi .....	78

Şekil 5.21: Tam yük ve değişik devirlerde oksijen (O <sub>2</sub> ) yüzdesinin değişimi .....	79
Şekil 5.22: Tam yük ve değişik devir ile karbon dioksit (CO <sub>2</sub> ) yüzdesinin değişimi ....	80
Şekil 5.23: Tam yük ve değişik devir ile azot oksitlerin (NO <sub>x</sub> ) değişimi .....	81
Şekil 5.24: Tam yük ve değişik devirlerde yanmamış HC değişimi .....	83
Şekil 5.25: Tam yük ve değişik devirlerde duman koyuluğunun değişimi .....	84
Şekil 5.26: 60 Nm sabit yük ve değişik devirlerde özgül yakıt tüketimi .....	86
Şekil 5.27: 60 Nm sabit yük ve değişik devirlerde termik verimin değişimi .....	87
Şekil 5.28: 60 Nm sabit yük ve değişik devirlerde egzoz gaz sıcaklıklarının değişimi .....	88
Şekil 5.29: 60 Nm sabit yük ve 1000 d/d'da silindir gaz basıncının KA'ya göre değişimi .....	90
Şekil 5.30: 60 Nm sabit yük ve 1500 d/d'da silindir gaz basıncının KA'ya göre değişimi .....	90
Şekil 5.31: 60 Nm sabit yük ve 2000 d/d'da silindir gaz basıncının KA'ya göre değişimi .....	90
Şekil 5.32: 60 Nm sabit yük ve 2500 d/d'da silindir gaz basıncının KA'ya göre değişimi .....	91
Şekil 5.33: 60 Nm sabit yük ve 3000 d/d'da silindir gaz basıncının KA'ya göre değişimi .....	91
Şekil 5.34: 60 Nm sabit yük ve 1000 d/d'da ısı dağılımının KA'ya göre değişimi .....	92
Şekil 5.35: 60 Nm sabit yük ve 1500 d/d'da ısı dağılımının KA'ya göre değişimi .....	92
Şekil 5.36: 60 Nm sabit yük ve 2000 d/d'da ısı dağılımının KA'ya göre değişimi .....	93
Şekil 5.37: 60 Nm sabit yük ve 2500 d/d'da ısı dağılımının KA'ya göre değişimi .....	93
Şekil 5.38: 60 Nm sabit yük ve 3000 d/d'da ısı dağılımının KA'ya göre değişimi .....	93
Şekil 5.39: 60 Nm sabit yük ve 1000 d/d'da yakıt hattı basıncının KA'ya göre değişimi .....	95
Şekil 5.40: 60 Nm sabit yük ve 1500 d/d'da yakıt hattı basıncının KA'ya göre değişimi .....	95
Şekil 5.41: 60 Nm sabit yük ve 2000 d/d'da yakıt hattı basıncının KA'ya göre değişimi .....	95
Şekil 5.42: 60 Nm sabit yük ve 2500 d/d'da yakıt hattı basıncının KA'ya göre değişimi .....	96
Şekil 5.43: 60 Nm sabit yük ve 3000 d/d'da yakıt hattı basıncının KA'ya göre değişimi .....	96
Şekil 5.44: 60 Nm sabit yük ve değişik devirlerde CO emisyonunun değişimi .....	99
Şekil 5.45: 60 Nm sabit yük ve değişik devirlerde oksijen (O <sub>2</sub> ) yüzdesinin değişimi ...	99
Şekil 5.46: 60 Nm sabit yük ve değişik devirlerde CO <sub>2</sub> emisyonunun değişimi .....	101
Şekil 5.47: 60 Nm sabit yük ve değişik devir ile azot oksitlerin (NO <sub>x</sub> ) değişimi .....	102
Şekil 5.48: 60 Nm sabit yük ve değişik devirlerde yanmamış HC değişimi .....	103
Şekil 5.49: 60 Nm sabit yük ve değişik devirlerde duman koyuluğunun değişimi .....	104
Şekil 5.50: 40 Nm sabit yük ve değişik devirlerde özgül yakıt tüketimi .....	105
Şekil 5.51: 40 Nm sabit yük ve değişik devirlerde termik verimin değişimi .....	106
Şekil 5.52: 40 Nm sabit yük ve değişik devirlerde egzoz gaz sıcaklıklarının değişimi .....	107
Şekil 5.53: 40 Nm sabit yük ve 1000 d/d'da silindir gaz basıncının KA'ya göre değişimi .....	108



Şekil 5.54: 40 Nm sabit yük ve 1500 d/d'da silindir gaz basıncının KA'ya göre değişimi .....	108
Şekil 5.55: 40 Nm sabit yük ve 2000 d/d'da silindir gaz basıncının KA'ya göre değişimi .....	109
Şekil 5.56: 40 Nm sabit yük ve 2500 d/d'da silindir gaz basıncının KA'ya göre değişimi .....	109
Şekil 5.57: 40 Nm sabit yük ve 3000 d/d'da silindir gaz basıncının KA'ya göre değişimi .....	109
Şekil 5.58: 40 Nm sabit yük ve 1000 d/d'da ısı dağılımının KA'ya göre değişimi .....	110
Şekil 5.59: 40 Nm sabit yük ve 1500 d/d'da ısı dağılımının KA'ya göre değişimi .....	111
Şekil 5.60: 40 Nm sabit yük ve 2000 d/d'da ısı dağılımının KA'ya göre değişimi .....	111
Şekil 5.61: 40 Nm sabit yük ve 2500 d/d'da ısı dağılımının KA'ya göre değişimi .....	111
Şekil 5.62: 40 Nm sabit yük ve 3000 d/d'da ısı dağılımının KA'ya göre değişimi .....	112
Şekil 5.63: 40 Nm sabit yük ve 1000 d/d'da yakıt hattı basıncının KA'ya göre değişimi .....	113
Şekil 5.64: 40 Nm sabit yük ve 1500 d/d'da yakıt hattı basıncının KA'ya göre değişimi .....	113
Şekil 5.65: 40 Nm sabit yük ve 2000 d/d'da yakıt hattı basıncının KA'ya göre değişimi .....	113
Şekil 5.66: 40 Nm sabit yük ve 2500 d/d'da yakıt hattı basıncının KA'ya göre değişimi .....	114
Şekil 5.67: 40 Nm sabit yük ve 3000 d/d'da yakıt hattı basıncının KA'ya göre değişimi .....	114
Şekil 5.68: 40 Nm sabit yük ve değişik devirlerde CO emisyonunun değişimi .....	117
Şekil 5.69: 40 Nm sabit yük ve değişik devirlerde O <sub>2</sub> yüzdesinin değişimi .....	117
Şekil 5.70: 40 Nm sabit yük ve değişik devirlerde CO <sub>2</sub> emisyonunun değişimi .....	118
Şekil 5.71: 40 Nm sabit yük ve değişik devir ile azot oksitlerin (NO <sub>x</sub> ) değişimi .....	119
Şekil 5.72: 40 Nm sabit yük ve değişik devirlerde yanmamış HC değişimi .....	120
Şekil 5.73: 40 Nm sabit yük ve değişik devirlerde duman koyuluğunun değişimi .....	121
Şekil 5.74: 20 Nm sabit yük ve değişik devirlerde özgül yakıt tüketimi .....	122
Şekil 5.75: 20 Nm sabit yük ve değişik devirlerde termik verimin değişimi .....	123
Şekil 5.76: 20 Nm sabit yük ve değişik devirlerde egzoz gaz sıcaklıklarının değişimi .....	124
Şekil 5.77: 20 Nm sabit yük ve 1000 d/d'da silindir gaz basıncının KA'ya göre değişimi .....	125
Şekil 5.78: 20 Nm sabit yük ve 1500 d/d'da silindir gaz basıncının KA'ya göre değişimi .....	125
Şekil 5.79: 20 Nm sabit yük ve 2000 d/d'da silindir gaz basıncının KA'ya göre değişimi .....	126
Şekil 5.80: 20 Nm sabit yük ve 2500 d/d'da silindir gaz basıncının KA'ya göre değişimi .....	126
Şekil 5.81: 20 Nm sabit yük ve 3000 d/d'da silindir gaz basıncının KA'ya göre değişimi .....	126
Şekil 5.82: 20 Nm sabit yük ve 1000 d/d'da ısı dağılımının KA'ya göre değişimi .....	127
Şekil 5.83: 20 Nm sabit yük ve 1500 d/d'da ısı dağılımının KA'ya göre değişimi .....	128
Şekil 5.84: 20 Nm sabit yük ve 2000 d/d'da ısı dağılımının KA'ya göre değişimi .....	128

Şekil 5.85: 20 Nm sabit yük ve 2500 d/d'da ısı dağılımının KA'ya göre değişimi.....	128
Şekil 5.86: 20 Nm sabit yük ve 3000 d/d'da ısı dağılımının KA'ya göre değişimi.....	129
Şekil 5.87: 20 Nm sabit yük ve 1000 d/d'da yakıt hattı basıncının KA'ya göre değişimi .....	130
Şekil 5.88: 20 Nm sabit yük ve 1500 d/d'da yakıt hattı basıncının KA'ya göre değişimi .....	130
Şekil 5.89: 20 Nm sabit yük ve 2000 d/d'da yakıt hattı basıncının KA'ya göre değişimi .....	130
Şekil 5.90: 20 Nm sabit yük ve 2500 d/d'da yakıt hattı basıncının KA'ya göre değişimi .....	131
Şekil 5.91: 20 Nm sabit yük ve 3000 d/d'da yakıt hattı basıncının KA'ya göre değişimi .....	131
Şekil 5.92: 20 Nm sabit yük ve değişik devirlerde CO emisyonunun değişimi .....	134
Şekil 5.93: 20 Nm sabit yük ve değişik devirlerde O <sub>2</sub> yüzdesinin değişimi .....	135
Şekil 5.94: 20 Nm sabit yük ve değişik devirlerde CO <sub>2</sub> emisyonunun değişimi .....	136
Şekil 5.95: 20 Nm sabit yük ve değişik devir ile azot oksitlerin (NO <sub>x</sub> ) değişimi .....	137
Şekil 5.96: 20 Nm sabit yük ve değişik devirlerde yanmamış HC değişimi .....	138
Şekil 5.97: 20 Nm sabit yük ve değişik devirlerde duman koyuluğunun değişimi.....	138
Şekil C.1: Yük hücresinin kalibrasyon eğrisi.....	158
Şekil D.1: 1. Sıcaklık ölçerin kalibrasyon eğrisi.....	159
Şekil D.2: 2. Sıcaklık ölçerin kalibrasyon eğrisi .....	160
Şekil D.3: 3. Sıcaklık ölçerin kalibrasyon eğrisi .....	160
Şekil D.4: 4. Sıcaklık ölçerin kalibrasyon eğrisi .....	160

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1: AB'ye üye ülkelerin biyodizel üretim miktarları .....	3
Tablo 3.1: Alkol tipinin ester dönüşümüne ve yoğunluğu üzerine etkisi .....	19
Tablo 3.2: Rafine ve atık palmiye yağına ait özellikler .....	25
Tablo 3.3: Rafine palmiye yağının yağ asidi bileşimi.....	26
Tablo 3.4: Küçük ölçekli transesterifikasyon reaksiyon girdileri .....	27
Tablo 3.5: Küçük ölçekli transesterifikasyon reaksiyon çıktıları.....	28
Tablo 3.6: Biyodizelin yağ asidi bileşimi .....	33
Tablo 3.7: Motor testlerinde kullanılan yakıtların fiziksel ve kimyasal özellikleri .....	34
Tablo 4.1: Deneyde kullanılan dizel motorunun teknik özellikleri .....	37
Tablo 4.2: Orifis plakasının ISO 5167 (1980) standardına göre tanımı.....	46
Tablo 4.3: Hafif ticari dizel araçlar için egzoz emisyon standartları .....	59
Tablo 4.4: UBA tarafından binek ve hafif ticari dizel araçlar için önerilen Euro5 emisyon standartları .....	60
Tablo 5.1: Tam yük ve 1000 d/d'da tutuşma gecikmesi .....	77
Tablo 5.2: Tam yük ve 1500 d/d'da tutuşma gecikmesi .....	77
Tablo 5.3: Tam yük ve 2000 d/d'da tutuşma gecikmesi .....	77
Tablo 5.4: Tam yük ve 2500 d/d'da tutuşma gecikmesi .....	77
Tablo 5.5: Tam yük ve 3000 d/d'da tutuşma gecikmesi .....	78
Tablo 5.6: Tam yükte motor devrine göre hava-yakıt oranları .....	80
Tablo 5.7: 60 Nm sabit yük ve 1000 d/d'da tutuşma gecikmesi.....	97
Tablo 5.8: 60 Nm sabit yük ve 1500 d/d'da tutuşma gecikmesi.....	97
Tablo 5.9: 60 Nm sabit yük ve 2000 d/d'da tutuşma gecikmesi.....	97
Tablo 5.10: 60 Nm sabit yük ve 2500 d/d'da tutuşma gecikmesi.....	97
Tablo 5.11: 60 Nm sabit yük ve 3000 d/d'da tutuşma gecikmesi.....	98
Tablo 5.12: 60 Nm sabit yükte motor devrine göre hava-yakıt oranları.....	100
Tablo 5.13: 40 Nm sabit yük ve 1000 d/d'da tutuşma gecikmesi.....	115
Tablo 5.14: 40 Nm sabit yük ve 1500 d/d'da tutuşma gecikmesi.....	115
Tablo 5.15: 40 Nm sabit yük ve 2000 d/d'da tutuşma gecikmesi.....	115
Tablo 5.16: 40 Nm sabit yük ve 2500 d/d'da tutuşma gecikmesi.....	115
Tablo 5.17: 40 Nm sabit yük ve 3000 d/d'da tutuşma gecikmesi.....	116
Tablo 5.18: 40 Nm sabit yükte motor devrine göre hava-yakıt oranları.....	117
Tablo 5.19: 20 Nm sabit yük ve 1000 d/d'da tutuşma gecikmesi.....	132
Tablo 5.20: 20 Nm sabit yük ve 1500 d/d'da tutuşma gecikmesi.....	132
Tablo 5.21: 20 Nm sabit yük ve 2000 d/d'da tutuşma gecikmesi.....	132
Tablo 5.22: 20 Nm sabit yük ve 2500 d/d'da tutuşma gecikmesi.....	133
Tablo 5.23: 20 Nm sabit yük ve 3000 d/d'da tutuşma gecikmesi.....	133
Tablo 5.24: 20 Nm sabit yükte motor devrine göre hava-yakıt oranları.....	135
Tablo A.1: Sample size for the test .....	133
Tablo B.1: Silindir gaz basıncı algılayıcısı ve sinyal şartlandırıcısının özellikleri.....	156
Tablo B.2: Yakıt hattı basınç algılayıcısının özellikleri.....	157

## SİMGELER VE KISALTMALAR

$b_e$	: özgül yakıt tüketimi (g/kW-saat)
$C_d$	: orifis katsayısı
$C_E$	: orifis plakası için genleşme katsayısı
$C_0$	: voltaj değeri ile doğru orantılı bir katsayı
$c_p$	: sabit basınçta özgül ısı (kJ/kgK)
$c_v$	: sabit hacimde özgül ısı (kJ/kgK)
$D$	: motorun silindir çapı (m)
$D_1$	: orifis plakasının dış çapı (m)
$D_2$	: orifis plakasının iç çapı (m)
$E_{AÖN}$	: piston AÖN'da iken sinyal şartlandırıcı çıkışındaki voltaj değeri (V)
$E_\theta$	: herhangi bir krank açısındaki voltaj değeri (V)
$F$	: kuvvet (Nm)
$h$	: özgül nem (g H <sub>2</sub> O / kg kuru hava)
$H_U$	: yakıtın alt ısı değeri (kJ/kg)
$HY$	: hava/yakıt oranı
$k$	: özgül ısılar oranı
$l$	: uzunluk (m)
$m$	: kütle (kg)
$M_d$	: döndürme momenti (Nm)
$\dot{m}_{h,g}$	: gerçek kütleli hava debisi (kg/sn)
$\dot{m}_y$	: birim zamandaki yakıt tüketimi (g/sn)
$n$	: motor devri (d/d)
$n_c$	: motorun silindir sayısı
$n_z$	: iki zamanlı motorlar için 1 dört zamanlı motorlar için 2 (devir/çevrim)
$P$	: basınç (kPa)
$P_{AÖN}$	: piston AÖN'daki basınç değerini (kPa)
$P_{atm}$	: mutlak atmosfer basıncı (kPa)
$P_e$	: motor efektif gücü (kW)
$P_{me}$	: ortalama efektif basınç (N/m <sup>2</sup> )
$P_\theta$	: herhangi bir andaki silindir içerisindeki mutlak basınç (kPa)
$P_v$	: su buharının kısmi basıncı (kPa)
$\dot{Q}$	: sistemin sınırlarına karşı yapılan ısı transfer
$Q_g$	: motora sürülen enerji miktarı (kJ)
$R$	: gaz sabiti (kJ/kgK)
$R_e$	: Reynolds sayısı

$S$	: pistonun kurs boyu (m)
$T$	: sıcaklık ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{atm}$	: ortam sıcaklığı (K)
$U$	: iç enerji
$V$	: hacim ( $\text{m}^3$ )
$V_H$	: toplam yer değiştirme hacmi ( $\text{m}^3$ )
$V_S$	: stok veya kurs hacmi ( $\text{m}^3$ )
$\dot{W}$	: sistem sınırlarının yer değiştirmesi ile oluşan sınır işi
$W_e$	: bir çevrimde yapılan iş (Nm/çevrim)
$\beta$	: orifis plakası için çap oranı
$\omega$	: açısal hız (1/sn)
$\rho_{hava}$	: havanın yoğunluğu ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
$\Delta P$	: iki nokta arasındaki basınç farkı (kPa)
$\theta$	: krank açısı ( $^{\circ}$ )
$\eta_t$	: termik verim
$\eta_v$	: volümetrik verim (%)

AB	: Avrupa Birliği
AÖN	: alt ölü nokta
B100	: %100 biyodizel
B20	: %20 biyodizel + %80 petrol kökenli dizel yakıtı (hacimsel)
B5	: %5 biyodizel + %95 petrol kökenli dizel yakıtı (hacimsel)
B50	: %50 biyodizel + %50 petrol kökenli dizel yakıtı (hacimsel)
CO	: karbon monoksit
CO <sub>2</sub>	: karbon dioksit
DP	: direkt püskürtmeli
EDP	: endirekt püskürtmeli
EMA	: The Engine Manufacturers Association
EPA	: U.S. Environmental Protection Agency
HC	: hidrokarbon
KA	: krank açısı
KOH	: potasyum hidroksit
MTEB	: Metil Tersiyer Bütil Eter
NO	: azot monoksit
NO <sub>x</sub>	: azot oksitler
nPAH	: nitrathı polisiklik aromatik hidrokarbon
OPEC	: Petrol İhraç Eden Ülkeler Örgütü
PKDY	: petrol kökenli dizel yakıtı
PM	: particulate matter
TAB	: Tersiyer Bütil Alkol
THC	: toplam hidrokarbon
UBA	: Almanya Çevre Bürosu
ÜÖN	: üst ölü nokta

# ATIK PALMIYE YAĞINDAN ÜRETİLEN BİYODİZELİN MOTOR PERFORMANS VE EMİSYON KARAKTERLERİ ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Ahmet Necati ÖZSEZEN

**Anahtar Kelimeler:** Biyodizel, Atık Kızartma Yağı, EDP Dizel Motor, Performans, Yanma, Püskürtme, Egzoz Emisyonları

**Özet:** Bu çalışmada, palmiye yağı kökenli atık kızartma yağından elde edilen biyodizel, dört silindirli, doğal emişli, indirekt püskürtmeli (EDP) bir dizel motorda alternatif dizel yakıtı olarak kullanılmıştır. Elde edilen motor test sonuçları, petrol kökenli dizel yakıtı (PKDY) ile yapılan ölçüm değerleri referans alınarak karşılaştırılmıştır. Motor performans, yanma, püskürtme ve egzoz emisyon karakterlerini belirlemek amacıyla, motor tam yük, 60, 40, 20 Nm sabit yük ve değişik devir testlerine tabi tutulmuştur. Deneyler sonucunda, biyodizel ve karışımları özgül yakıt tüketiminde artış gösterirken, motor performansında ise PKDY'ye göre hafif bir düşme olmuştur. Genelde biyodizel ve karışımlarının kullanılması ile silindir gaz basıncının PKDY'ye göre daha yüksek olduğu ve üst ölü noktaya biraz daha yaklaştığı ortaya çıkmıştır. Bütün test şartlarında, test motorunda biyodizel kullanıldığı zaman, tutuşma gecikmesi kısalmış ve püskürtme başlangıcı PKDY'ye göre daha erken olmuştur. Deneylerde, her bir yakıt için karbon monoksit (CO), karbon dioksit (CO<sub>2</sub>), yanmamış hidrokarbon (HC), azot oksit (NO<sub>x</sub>) ve duman koyuluğu değerleri ölçülmüştür. Emisyon testleri sonucunda, biyodizelin oksijen içeriği, HC, CO ve duman koyuluğu emisyonlarında önemli azalmalar sağladığı belirlenmiştir. Fakat test motorunda biyodizel ve karışımlarının kullanımı ile NO<sub>x</sub> emisyonunda artış görülmüştür.

# INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF BIODIESEL PRODUCED FROM WASTE PALM OIL ON THE ENGINE PERFORMANCE AND EMISSION CHARACTERISTICS

Ahmet Necati ÖZSEZEN

**Keywords:** Biodiesel, Waste Frying Oil, IDI Diesel Engine, Performance, Combustion, Injection, Exhaust Emissions

**Abstract:** In this study, the biodiesel produced from waste frying oil based palm-oil were used as an alternative diesel fuel in a four-cylinder, naturally aspirated, indirect (IDI) diesel engine. Obtained engine test results were compared with reference values which were determined by using petroleum-based diesel fuel (PBDF). In order to determine the engine performance, combustion, injection and exhaust emission characteristics, the engine was exposed with full load, 60, 40, 20 Nm constant load and varied speed tests. In the results of experiments, biodiesel and its blends showed a slight drop in the engine performance, while the brake specific fuel consumption (bsfc) increased compared to PBDF. Generally, when biodiesel and its blends were used, the peak cylinder gas pressure occurred higher than that of PBDF and closed slightly to top dead center. In the all test conditions, when biodiesel was used, the ignition delays and the start of injection timings of biodiesel taked place shorter and earlier than those of PBDF. In the experiments, carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), unburned hydrocarbon (HC), nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) and smoke opacity values had been measured for each fuel. In the results of emission tests, it has determined that the oxygen content of biodiesel has provided significant reduction in HC, CO and smoke opacity emissions. But, when the test engine fuelled with biodiesel and its blends, NO<sub>x</sub> emissions have been seen increased.

## 1. GİRİŞ

Dizel motorlar, dünyanın gelişen ve gelişmekte olan ülkelerinde özellikle taşımacılık sisteminde teknolojinin gelişmesi ile birlikte daha hayati bir öneme sahip olmuştur. Bununla birlikte, dizel motorlardan kaynaklanan egzoz emisyonları çevre kirliliğini önemli derece etkilemektedir. Dizel motorlarda kullanılan petrol kökenli yakıtlar yüksek miktarda aromatik bileşik ve sülfür içermekte, bunlarda çevre kirliliğine neden olmaktadır. Avrupa Birliği (AB) komisyonu dizel motorlu taşıtlardan kaynaklanan egzoz emisyonlarını sınırlamak için bazı direktifler (Euro 4/5 için 2005/55/EC vb. gibi) yayınlamıştır. Araştırmacılar bu direktifleri karşılayabilmek için yüksek performanslı düşük emisyonlu dizel motorlar geliştirmeye yönelmiştir. Günümüzde taşıt üreticileri, yüksek basınçlı yakıt püskürtme sistemleri, kademeli püskürtme, üç yollu katalitik konvertör, egzoz gazı geri dönüşümü, partikül filtreleri, dizel motor yönetimi tarafından püskürtme başlangıcının kontrolü gibi sistemlerden yararlanarak dizel motorlu taşıtlardan kaynaklanan egzoz emisyonlarını kabul edilebilir sınırlar içerisine çekmeye çalışmaktadır [1]. Bununla birlikte, NO<sub>x</sub> ve partikül emisyonu standardını karşılamak için kullanılan ek sistemler başka çevresel problemleri de beraberinde getirmektedir. Dizel motorların emisyon problemini çözmek için bir yaklaşım oksijenli yakıtların kullanılmasıdır. Ayrıca oksijenli yakıtların genelde petrol kökenli kaynaklardan üretilmemesi (biyokütle, biyoyakıt vb. gibi) bu yakıtlara stratejik ve ekonomik bir önem kazandırmaktadır.

Oksijenli yakıtların alternatif dizel yakıtı olarak veya petrol kökenli yakıtlara karıştırılarak kullanılması, içten yanmalı motorlu araçlardan kaynaklanan egzoz emisyonlarını azaltmada, her zaman gündemde olan bir konu olmuştur. Oksijenli yakıtlardan en büyük ilgiyi, metanol (CH<sub>3</sub>OH), etanol (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH), tersiyer bütül alkol (TBA) (C<sub>4</sub>H<sub>9</sub>OH) ve metil tersiyer bütül eter görmüştür [2]. Metil tersiyer bütül eter (MTEB) ve etanolun benzine belirli oranlarda karıştırılması ile buji ateşlemeli motorlardan kaynaklanan emisyonlarda önemli azalmalar sağlanmıştır. Oksijenli yakıtların buji ateşlemeli motorlardaki başarısı oksijenli bileşiklerin dizel yakıtına



katkı olarak kullanımını tetiklemiştir. Oksijenli yakıtların dizel yakıtına katkı olarak kullanılması egzoz emisyonları azalttığı birçok makalede ifade edilmiştir. Bu makaleler, literatür araştırması adı altında ayrıntılı olarak verilmiştir. Dizel katkısı olarak kullanılan oksijenli bileşikler yapısal olarak petrol kökenli dizel yakıtına (PKDY) benzemektedir. Oksijen katkılı yakıtın ilavesi ile bir veya daha fazla oksijen atomu hidrokarbon zincirine bağlanmaktadır [3]. Bir dizel motorlu araçta kullanılan yakıtın ( $C_xH_y$ ) havada bulunan oksijen ile tam yanmaması sonucunda, yanmamış HC'lar (parafinler, olefinler, aromatik hidrokarbonlar), yarı yanmış HC'lar (aldehitler, ketonlar, karboksilik asitler), CO, ısıl parçalanma ürünleri ve türevleri (asetilen, etilen, hidrojen, karbon (is veya parçaçık)) ve yan yanma ürünleri (atmosferik azottan kaynaklanan  $NO_x$ 'ler, yakıtın saf olmayışından kaynaklanan  $SO_x$ 'ler) oluşmaktadır  $SO_x$  asit yağmurlarına neden olurken,  $NO_x$  ve  $CO_2$  sera gazı etkisi göstererek küresel ısınmaya sebebiyet vermektedir [4, 5].

Dünyada içten yanmalı motorların gelişimini başlıca iki konu yönlendirmektedir. Birincisi, ozon tabakası üzerine etki eden nitrojen oksit emisyonlarının salınımı sonucu artan küresel ısınmadır. İkincisi ise insan sağlığında toksik etkisi gösteren partikül emisyonlarıdır. En son 1997'de küresel ısınmada sera etkisi gösteren karbon dioksit ( $CO_2$ ) emisyonunun azaltılması için 30 endüstriyel devlet tarafından Japonya'nın Kyoto şehrinde Kyoto Protokolü imzalanmıştır [6]. 2004 yılında Rusya da bu protokolü resmen tanıyarak üye ülkeler arasına girmiştir. Kyoto protokolü ile 2012 yılına kadar sera etkisi gösteren emisyonlarda ciddi bir azalma hedeflenmektedir. Ayrıca, AB komisyonu da 2010 yılına kadar yenilenebilir enerji pazar payını %12'ye artırmayı önermektedir. AB komisyonu şu an için %2 oranına sahip (biyodizel + standart dizel yakıtı) karışımlarının kullanılmasını önerirken, bu oranın 31 Aralık 2010'a kadar %5,75'lere, 2012 itibarı ile %18 karışım oranlarına çekilmesini istemektedir. AB bu önerisi ile 2030 yılına kadar dünya ulaşım sektöründe kullanılacak yakıtın %4'ünün biyoyakıt kaynaklarından sağlanmasını planlanmaktadır. AB komisyonu ilk adım olarak 8 Mayıs 2003'de, ulaşım sektöründe kullanılmak üzere biyoyakıt üretimini teşvik eden 2003/30/EC sayılı direktifi yayımlamıştır. Bu direktifler doğrultusunda Avrupa'da biyodizel üretimi 2005 itibarı ile 3,2 milyon tona ulaşmıştır. Tablo 1.1'de AB komisyonun teşviki doğrultusunda üye ülkelerin biyodizel üretim miktarları gösterilmektedir.

Tablo 1.1:AB'ye üye ülkelerin biyodizel üretim miktarları [7]

	2002	2003	2004	2005
Almanya	450,000	715,000	1,035,000	1,669,000
Fransa	366,000	357,000	348,000	492,000
İtalya	210,000	273,000	320,000	396,000
Avusturya	25,000	32,000	57,000	85,000
İspanya	-	6,000	13,000	73,000
Danimarka	10,000	40,000	70,000	71,000
İngiltere	3,000	9,000	9,000	51,000
İsveç	1,000	1,000	1,400	1,000
Çek Cumhuriyeti	-	-	60,000	133,000
Slovakya	-	-	15,000	78,000
Litvanya	-	-	5,000	7,000
Polonya	-	-	-	100,000
Diğer Ülkeler	-	-	-	28,000
<b>Toplam</b>	1,065,000 ton	1,433,000 ton	1,933,400 ton	3,184,000 ton

Dünyada birçok ülkede biyodizel üretimi ve bu yakıtların dizel motorlarında kullanımı ile ilgili çalışmalar yoğun olarak sürmektedir. Fransa ve Almanya, bu ülkeler arasında Avrupa'daki en büyük üreticilerdir. 2005 yılında Almanya'da  $1,67 \times 10^6$  ton, Fransa'da  $4,92 \times 10^5$  ton biyodizel üretimi gerçekleştirilmiştir. National Biodiesel Board'ın 2002 yılındaki raporuna göre Amerika Birleşik Devletlerinde sadece yellow grease'den  $2,4 \times 10^5$  ton ile  $3,2 \times 10^5$  ton arasında biyodizel üretimi gerçekleştirildiği tahmin edilmektedir.

Biyodizel bitkisel ve hayvansal yağlardan üretilen yüksek oksijen içeriğine (%10–12) sahip alternatif bir dizel yakıtıdır. İlk dizel motorlarda dizel yakıtı olarak bitkisel kökenli yağlar kullanmasına rağmen, bu yakıtların motorlarda oluşturduğu problemler dikkate alınarak, motor üreticileri fosil yakıtlara yönelmiştir. Oksijenli yakıtların egzoz emisyonlarını azaltmadaki başarısı ve artan çevre bilinci biyodizel olarak adlandırılan yağ asitlerinin dizel motorlarında kullanımını 1980'li yılların başında tekrar gündeme getirmiştir. Bitkisel yağlar bazı kritik zamanlarda (1930–1940, 1973 petrol krizi gibi - 1973 krizinde bir gecede varil başına 5\$'dan 11\$'a fırlamış) sadece acil durumlar için dizel motorlarda kullanılmıştır [8]. Fakat bitkisel yağların PKDY'a nazaran viskozitelerinin ve moleküler ağırlığının daha yüksek olması, zayıf yakıt atomizasyonuna, içeriğinde gliserin bulundurması, silindir içerisinde tortulara, yapışkan maddelere, karbon birikimini neden olmaktadır. Bu

durum, bitkisel yağ kullanılan motorlarda ciddi problemler oluşturmuştur. Bitkisel, hayvansal veya atık bitkisel yağların dizel motorunda herhangi bir değişiklik yapılmadan kullanılabilmesi için PKDY'a yakın özelliklere sahip bir yakıtla dönüştürülmesi gerekmektedir. Bitkisel ve hayvansal yağların dizel yakıtına dönüştürülmesinde dört metot vardır. Bunlar, bitkisel ve hayvansal yağın motorin ile seyreltilmesi, termal kraking (pyrolysis), mikro emülsiyonlama ve transesterifikasyon reaksiyonudur (Transesterification) [9, 10]. Transesterifikasyon reaksiyonu son zamanlardaki araştırmalarda üzerinde en çok durulan metottur. Bu metotlar ile üretilen biyodizel fosil kökenli dizel yakıtları ile yanma sonu emisyonları açısından karşılaştırıldığında; daha düşük CO, partikül ve yanmamış HC emisyonu üretmektedir. Biyodizelin yenilenebilir bir alternatif dizel yakıtıdır ve yanma sonu ürünlerindeki CO<sub>2</sub> tekrar fotosentez çevrimine katıldığı düşünülmektedir. Bu durum dizel motorlardan kaynaklanan emisyonların, sera gazları üzerine etkisini minimize etmektedir.

Biyodizelin ticarileşmesinin önündeki başlıca engel biyodizelin PKDY'a göre maliyetinin daha yüksek olmasıdır. Biyodizelin üretiminde maliyetin azaltılabilmesi için ham madde olarak atık bitkisel yağların (Restaurant ve evsel atık yağlar) kullanılması, sürekli transesterifikasyon reaksiyonu ve biyodizel üretiminde yan ürün olarak çıkan gliserinin saflaştırılması düşünülebilir. İspanya Uluslararası İstatistik Enstitüsü'nün (INE) 2001 raporuna göre, İspanya'da her yıl yaklaşık  $7,4 \times 10^3$  ton atık zeytinyağı toplanmakta, bu değerden çok daha fazlası da kanalizasyon şebekesine atık olarak dökülmektedir [11]. Yine aynı rapora göre 2001 yılında İspanya'daki 2 Numaralı dizel yakıt tüketimi yaklaşık  $2,4 \times 10^7$  ton'dur. Japonya'da yapılan bir çalışmada [12], Japonya'nın yıllık  $4 \times 10^5$  ile  $6 \times 10^5$  ton arasında atık bitkisel yağına sahip olduğu belirtilmiştir. Bu miktarın yaklaşık  $2,5 \sim 2,6 \times 10^5$  tonu endüstri vb. gibi kısımlarda,  $1,5 \sim 1,8 \times 10^5$  tonu hayvan yemlerine katkı olarak,  $5 \sim 6 \times 10^4$  tonu yağ asitlerine dönüştürülerek kullanılmıştır. Bu atık yakıt kaynağının harekete geçirilmesi hem alternatif yakıt kaynakları açısından hem de çevresel açıdan önemli bir avantajdır. Bu nedenle, atık bitkisel yağlardan üretilen biyodizelin, Avrupa ve Amerika'daki yakıt istasyonlarında dizel motorları için alternatif yakıt olarak satılması ticari hayata katkı sağlanmıştır. Şimdiye kadar Türkiye'de ise atık yağların sadece küçük bir yüzdesi toplanarak sabun üretiminde kullanılmıştır. Ülkemizde atık

bitkisel yağların toplanarak biyodizele dönüştürülmesi ile bu yağların çevresel olmayan yollarla imhasının önlenmesi, atık bir enerji kaynağının tekrar hayata geçirilmesi ve atık yağlardan üretilen biyodizelin rafine yağlarından üretilen biyodizele oranla maliyetinin çok daha düşük olması gibi avantajlar, atık bitkisel yağlardan biyodizel üretiminin önünü açacaktır.

Türkiye 'de biyokütle enerjisinin birincil enerjiler içinde kullanımı 1989 'da %15,2, 1994 'de ise %12,4 oranında gerçekleşmiştir. Petrolde dışa bağımlı bir ülke olan Türkiye 2004 sonuna kadar Tüpraş kanalıyla 22,3 milyon ton, Ataş kanalıyla 1,7 milyon ton ham petrol ithal etmiştir. Petrol tüketimimizin ancak %15'i yerli üretimle sağlanabilmekteyiz. Petrol tüketiminde en büyük pay %34 ile motorine aittir. Ülkemizde petrol kaynaklarının yetersiz olması diğer yandan yaşanan enerji krizleri, alternatif enerji kaynak arayışlarına hız kazandırmıştır. Türkiye'de biyoyakıt kullanımı, öncelikle tüketici tasarrufunu ve petrol ithalatının azaltılmasını sağlarken, ikinci seviyede temiz çevrenin gelişimine önemli katkı sağlayacaktır [13, 14].

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

İlk olarak Rudolf Diesel, kendi icat ettiği dizel motorda yakıt olarak Afrika kökenli yer fıstığı yağını kullanmasına rağmen, günümüze kadar enerji içeriği daha yüksek ve daha ucuz olan fosil kökenli yakıtlar, dizel motorlarda daha yaygın olarak kullanılmıştır. Petrol İhraç Eden Ülkeler Örgütü'nün (OPEC) petrol üretimini azaltması, petrol fiyatlarındaki artış ve çevresel problemler araştırmacıları alternatif yakıt arayışlarına sevk etmiştir. Alternatif yakıtlar içerisinde dizel motorlar için en büyük ilgiyi biyodizel görmüştür. Biyodizelin dizel motorda herhangi bir değişiklik yapılmadan kullanılabilmesi, uzun süreli performans testlerinde herhangi bir probleme rastlanmaması ve yöresel kaynaklara bağlı olması, biyodizeli ön plana çıkaran faktörlerdir. Ayrıca, biyodizel egzoz emisyon standartlarını yakalamak için kullanılan katalitik konvertör ve partikül filtrelerine zarar vermemektedir. Bitkisel veya atık bitkisel yağlar dizel motorlarda genelde iki farklı şekilde kullanılabilir.

Birincisi, bitkisel veya atık bitkisel yağların saf halde veya çeşitli oranlarda petrol kökenli dizel yakıtı ile karıştırılarak, dizel motorda herhangi bir değişiklik yapılmadan direkt olarak kullanılmasıdır. Atık bitkisel yağların direkt kullanılabilmesi için yağın içerisindeki su ve yabancı maddeler ayrıştırılmaktadır [15]. Atık bitkisel yağların bu şekilde kullanılması ile kısa süreli testlerde başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Anon [16] 1982 yılında yaptığı çalışmada, atık bitkisel yağları filtre ettikten sonra %95 atık bitkisel yağ ile %5 PKDY karıştırarak bir dizel motorda test etmiştir. Anon bu çalışmasında, karışımı soğuk çevre şartlarından koruyabilmek için karıştırma ve ön ısıtma işlemleri uygulamıştır. Anon, testlerin sonucunda motorda karbon birikintisi ve koklaşma problemlerine rastlanmadığını ifade etmiştir. Yalnız bu çalışmada görülen en önemli problem doymuş bitkisel yağların, yağlama yağının viskozitesini arttırmasıdır. Anon, yağlama yağının 5000–5500 km de değiştirilmesi gerektiğini vurgulamıştır.

Karaosmanoğlu ve diğ., [17] ayçiçeği yağını, tek silindirli, direkt püskürtmeli bir dizel motorda 50 saat test süresince direkt olarak kullanmışlardır. Testler sonucunda ayçiçeği yağını referans dizel yakıtına göre karşılaştırmışlardır. Performans açısından incelediklerinde ayçiçeği yağı kullanımı ile motor gücü azalırken, özgül yakıt tüketiminde artış olduğunu gözlemlemişlerdir. Enjektörü incelendiklerinde enjektör üzerinde bir karbon tabakasına rastlamamışlardır. Egzoz emisyonları açısından incelediklerinde, CO, CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>x</sub> ve HC emisyonlarında artış olurken sadece is emisyonunda bir azalma olduğunu ifade etmişlerdir. Emisyonlardaki artışı, yağın viskozitesinin çok yüksek olmasından dolayı yeterli oranda atomizasyon sağlanamaması şeklinde yorumlamışlardır. HC emisyonunun %60–70 oranında artış göstermesini, ayçiçeği yağının setan sayısının PKDY nazaran düşük olmasına bağlayarak, tam yanma gerçekleşemediğini ifade etmişlerdir.

Yu ve diğ., [18] palmiye yağı kökenli atık bitkisel yağı, tek silindirli, direkt püskürtmeli bir dizel motorda (Yanmar 160AE-D) test ederek yanma karakteristiklerini incelemişlerdir. Yakıtın, filtreden, borulardan ve yüksek basınç pompasından rahat akabilmesi için sıcaklığını 70°C'ye çıkarmışlardır. Testler sonucunda, atık bitkisel yağın tutuşma gecikmesinin 2 numaralı dizel yakıtına oranla daha kısa olduğunu, ısı dağılımının ise daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Araştırmacılar, yüksek sıcaklıktaki ortama atık bitkisel yağın püskürtülmesiyle oluşan kimyasal reaksiyonlarda, yüksek moleköl ağırlığına sahip doymamış yağ asidinin parçalanması ile daha düşük moleköl ağırlığına sahip gaz ürünlerinin oluştuğunu, böylece daha uçucu ve yanıcı gazların tutuşma gecikmesini kısalttığı ifade etmişlerdir. Emisyon testlerinde ise atık bitkisel yağın CO emisyonu %29,4, NO emisyonu %30 2 numaralı dizel yakıtına göre daha yüksek, SO<sub>2</sub> emisyonu ise hem atık bitkisel yağ hem de 2 numaralı dizel yakıtı için 50 ppm'in altında olduğunu belirtmişlerdir.

Kalam ve diğ., [19] çeşitli oranlardaki (%10-20-30-40-50 ve %100) hindistancevizi yağını PKDY ile karıştırarak, karışımların motor performans ve emisyon karakteristikleri üzerine etkisini incelemişlerdir. Test motoru olarak; dört silindirli, ön yanma odalı bir dizel motoru (Isuzu 4FB1) kullanmışlardır. Testlerin sonucunda, karışımların PKDY benzer efektif güç ürettiğini, özgül yakıt tüketimlerinin ise daha

fazla olduğunu ifade etmişlerdir. Araştırmacılar, enjektör memelerinde önemli bir karbon birikimine rastlamamışlardır. Emisyon testlerinde, CO<sub>2</sub> hariç, karışımda artan hindistancevizi yağı ile eş orantılı olarak azalma gözlemlenmiştir.

Ziejewski ve diğ., [20] %25 oranında yüksek oleik asidi içerikli ayçiçek yağı ile %75 2 numaralı dizel yakıtı ve %25 oranında yüksek oleik asidi içerikli aspir yağı ile %75 2 numaralı dizel yakıtını karıştırarak, EMA'nın (The Engine Manufacturers Association) 200 saatlik dayanıklılık test prosedürüne göre karışımların motor parçaları üzerine etkisini incelemişlerdir. Araştırmacılar, yaptıkları çalışmanın sonucunda, emme supabının kafasında karbonlaşma oranını ayçiçek yağlı karışım için 2,20, aspir yağlı karışım için 2,20, 2 numaralı dizel yakıtı için 2,00, piston tepesindeki karbonlaşma oranını ayçiçek yağlı karışım için 1,50, aspir yağlı karışım için 1,44, 2 numaralı dizel yakıtı için 1,46 olduğunu tespit etmişlerdir. Ziejewski ve diğ. üç test yakıtının motor parçalarında yaptığı karbonlaşma miktarları arasında önemli bir fark olmadığını ifade etmişlerdir.

Birçok araştırmacı, bitkisel yağlar dizel motorda uzun süreli olarak kullanıldığında, enjektörlerde karbon birikimi, yanma odası duvarlarında yapışkan maddelerin oluşmasından dolayı segmanlarda sıkışma, yağlama yağının kalınlaşması gibi problemler meydana getirdiğini ifade etmiştir. Bu problemler bitkisel yağın yüksek viskozitesi, düşük uçuculuğu ile ilişkilendirilmişlerdir [21–23]. Genel olarak, bitkisel yağın yüksek viskozitesi, düşük uçuculuğu, yüksek kaynama noktası gibi özellikleri dizel motorların, yakıt püskürtme sistemini olumsuz yönde etkilemektedir. Özellikle, püskürtme açısının küçülmesi (azalan atomizasyon) ile artan penetrasyon, yanma veriminin düşmesine neden olmaktadır.

İkincisi, bitkisel veya atık bitkisel yağları, esterlerine (biyodizel) dönüştürerek dizel motorda kullanmaktır. Bitkisel yağların esterlerine dönüştürülmesinde en dikkati çeken yöntem transesterifikasyon reaksiyonu (alkoliz) olmuştur. Bu yöntemle yağın viskozitesi azalırken setan sayısı ve oksijen içeriği değişmemektedir. Biyodizelin yakıt özellikleri kullanılan yağ kaynağına ve üretiminde kullanılan alkol tipine göre değişiklik gösterebilmektedir. Bu durum her biyodizel için farklı tutuşma, yanma ve emisyon değerlerinin oluşmasına neden olmaktadır. Biyodizelin en önemli özelliği

setan sayısının PKDY oranla daha yüksek olmasıdır. Setan sayısı yakıtın tutuşma kabiliyetini gösterdiğinden dolayı önemli bir yakıt özelliğidir. Soğuk olmayan ortamlar haricinde uzun süreli testlerde, biyodizelin motorda herhangi bir değişiklik yapılmadan kullanılabilir önemli bir alternatif dizel yakıtı olduğu görülmüştür [8, 9]. Biyodizel ile yapılan çalışmalarda genellikle, biyodizel PKDY benzer performans değerleri gösterirken, özgül yakıt tüketiminde artışa sebep olmaktadır. Bazı çalışmalarda bunun tam tersi sonuçlar da elde edilmiştir [24, 25]. Özgül yakıt tüketiminin artışıdaki temel neden, biyodizelin enerji içeriğinin PKDY nazaran daha düşük olmasıdır.

İlk olarak, 1938 yılında Walton yayınladığı çalışmada, yağdaki mono-di-trigliseridlerin ayrıştırılması sonucunda elde edilen yağ asitlerinin yakıt olarak kullanılmasını önermiştir. Walton yaptığı çalışmada, soya, hurma, pamuk yağını bir dizel motorda test yakıtı olarak kullanarak modern bir dizel motorunun verimine benzer sonuçlar elde etmiştir. Walton soya, hurma, pamuk yağını, PKDY ile karşılaştırdığında yakıt tüketiminde azalma tespit etmiştir. Bunun birlikte Walton, kullanılan tüm yağların; karbon çökeltisi, akma noktası problemleri sergilediğini, ayrıca, hurma yağının bakır, pirinç gibi malzemelerde önemli derecede korozyon meydana getirdiğini belirtmiştir [26].

Peterson ve diğ., [27] atık hidrojene soya yağından üretilen soya yağı etil esteri ile 2 numaralı dizel yakıtını, performans ve emisyon açısından karşılaştırmıştır. Araştırmacılar, motor performans testleri için 4 silindirli, turboşarjlı, direkt püskürtmeli bir dizel motoru (John Deere 4239 T) kullanılır iken, emisyon testleri için 4 silindirli, turboşarjlı, direkt püskürtmeli ve ara soğutmalı (intercooled) bir dizel motoru (Cummins) kullanmışlardır. Araştırmacılar, yaptıkları çalışmanın sonucunda, biyodizelin yanma ısısının 2 numaralı dizel yakıtına göre %12 daha az olduğunu gözlemlemişlerdir. Testlerde, biyodizel kullanımı ile motor gücünde %4,8, maksimum motor momentinde 1300 d/d için %3,2, 1700 d/d için %6, 2 numaralı dizel yakıtına göre azalma olduğunu ifade etmişlerdir. Emisyon test sonucunda ise biyodizel kullanımı ile yanmamış HC emisyonunda %54, CO emisyonunda %46, CO<sub>2</sub> emisyonunda %0,57, PM emisyonunda %14 azalma sağlanırken NO<sub>x</sub> emisyonunun %14,7 artış olduğunu gözlemlemişlerdir.



Graboski ve diğ., [28] %100 soya metil esteri ve %20, %35 ve %65 oranlarında soya yağı metil esteri ile 2 numaralı dizel yakıtı karışımlarının egzoz emisyonları üzerine etkisini incelemiştir. Araştırmacılar, yaptıkları testler sonucunda biyodizelin yüzdesindeki artışla eş orantılı olarak THC (toplam hidrokarbon), CO ve PM emisyonlarının azaldığını, NO<sub>x</sub> emisyonunun ise arttığını raporlamışlardır. %100 soya yağı metil esteri testlerinde NO<sub>x</sub> oluşumu, 2 numaralı dizel yakıtına göre %11 artarken, PM %66, CO %47 ve THC %44 azaldığını gözlemlemiştir.

Masjuki ve diğ., [29] palmiye yağı metil esteri ve emülsiyonlarının motor performans ve egzoz emisyonları üzerine etkisini incelemiştir. Test yakıtı olarak %5 ve %10 oranında fosil ve palmiye yağı metil esterine su karıştırarak, %100 fosil yakıt ve %100 palmiye yağı metil esterini baz alarak karşılaştırmışlardır. Test motoru olarak, dört silindri, ön yanma odalı bir dizel motoru (Isuzu 4FB1) kullanmışlardır. Testlerin sonucunda, palmiye yağı metil esteri ve emülsiyonlarının fosil yakıtla oranla daha az çıkış gücü sağladığını gözlemlemiştir. Emülsiyona edilmiş palmiye yağı metil esterinin enjektör memesindeki karbon birikimini azalttığını ve emülsiyona edilmiş yakıtların ve palmiye yağı metil esterinin egzoz sıcaklığının fosil yakıtla göre daha düşük olduğunu gözlemlemiştir. %100 Palmiye yağı metil esteri için yapılan emisyon testleri sonucunda, fosil dizel yakıtına göre CO ve yanmamış HC emisyonlarının sırasıyla %8,8, %8,6 azaldığını fakat NO<sub>x</sub> emisyonunun %9,3 oranında arttığını ifade etmişlerdir.

Monyem ve Van Gerpen [30] biyodizelin oksitlenme durumunun motor performans ve emisyonları üzerine etkisini incelemiştir. Yaptıkları çalışmada, oksitlenmiş ve oksitlenmemiş biyodizeli direkt püskürtmeli bir dizel motorda test ederek 2 numaralı dizel yakıtı ile karşılaştırmışlardır. Yaptıkları çalışmanın sonucunda, okside olmuş biyodizel %15,1, okside olmamış biyodizel %13,8 2 numaralı dizel yakıtla göre daha fazla yakıt tüketimi sergilediğini gözlemlemiştir. Egzoz emisyonlarını incelediklerinde, okside olmuş biyodizel %15, oksitlenmemiş biyodizel %28 oranında daha az CO, okside olmuş biyodizel %16, oksitlenmemiş biyodizel %51 oranında daha az yanmamış HC üretir iken okside olmuş biyodizel ile oksitlenmemiş biyodizel arasında is emisyonu ve NO<sub>x</sub> üretiminde önemli bir fark olmadığını ifade etmişlerdir.

2001 yılında Çanakçı [31], yaptığı doktora çalışmasında yüksek serbest yağ asidi içeren yağlardan biyodizel üretimi ve üretilen biyodizelin, motor performans ve emisyon karakterleri üzerine etkisini incelemiştir. Bu çalışmada Çanakçı, üretilen biyodizelleri, %100 soya yağı metil esteri ile 2 numaralı dizel yakıtını temel alarak karşılaştırmak için direkt püskürtmeli, dört silindirli, turboşarjlı bir dizel motor (Jhon Deere 4276 T) kullanmıştır. Yellow grease'ten üretilen metil esterlerin termik veriminin 2 numaralı dizel yakıtına benzer olduğunu, fakat yakıt tüketiminin 2 numaralı dizel yakıtına oranla daha yüksek olduğunu gözlemlemiştir. Çanakçı, tam yük test şartlarında yaptığı emisyon testleri sonucunda, 2 numaralı dizel yakıtına oranla biyodizel kullanımı ile CO emisyonunun %17,77 ve yanmamış HC emisyonunun %46,27 azaldığını, fakat NO<sub>x</sub> emisyonunu %11,60 oranında arttırdığını gözlemlemiştir. Soya yağı metil esteri ile yellow grease metil esteri arasında motor performansı ve emisyon açısından önemli bir değişim olmadığını ifade etmiştir.

Haas ve diğ., [32] soya yağı rafinerisinde yan ürün olarak çıkan yağları kullanarak biyodizel üretimi gerçekleştirmişlerdir. Bu yağlar yüksek oranda serbest yağ asidi, su, fosforik ve gliserid içermektedir. Araştırmacılar, küçük ölçekli bir proses geliştirerek ucuz olan bu kaynağının hayata geçirilmesini hedeflemiştir. Ürettikleri biyodizelleri direkt püskürtmeli bir dizel taşıtta (1991 DDC Series 60) performans ve emisyon testlerine tabi tutmuşlardır. Test yakıtı olarak, %100 biyodizel, %20 biyodizel + %80 2 numaralı dizel yakıtı karışımını seçmişlerdir. Araştırmacılar testlerin sonucunda, 2 numaralı dizel yakıtına oranla biyodizel kullanımı ile THC, PM ve CO emisyonunun sırasıyla %55, %53, %48 azaldığını fakat NO<sub>x</sub> emisyonunun %9 oranında arttırdığını gözlemlemiştir. Ayrıca, biyodizelin 2 numaralı dizel yakıtına göre özgül yakıt tüketiminin %18 daha fazla olduğunu ifade etmişlerdir. %20 biyodizel + %80 2 numaralı dizel yakıt karışımı için yaptıkları testlerin sonucunda, 2 numaralı dizel yakıtına oranla biyodizel karışımının THC emisyonunu %27,7, PM emisyonunu %19,7 ve CO emisyonunu %2,4 azalttığı fakat NO<sub>x</sub> emisyonunu %1,3 oranında arttırdığını gözlemlemiştir.

Dorado ve diğ., [11] İspanyadaki hastane yemekhanelerindeki atık zeytin yağlarını toplayarak transesterifikasyon reaksiyonuna tabi tutmuşlardır. Reaksiyon sonunda oluşan metil ester ve PKDY karışımlarını, 3 silindirli, direkt püskürtmeli bir dizel

motorda 50 saatlik performans testinde kullanmışlardır. Testin başlangıcında biyodizel PKDY'a göre %5,7 daha fazla maksimum güç üretirken, 50 saatlik sonucunda biyodizel maksimum güçte PKDY'a göre %8'lik bir kayıp oluşturduğunu gözlemlemişlerdir. Biyodizelin özgül yakıt tüketimi PKDY'a göre test başlangıcında %6,4, test sonunda %26 daha fazla olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca her iki yakıt için yapılan testte de motor parçalarında karbon çökeltisi ve aşınmaya rastlamamışlardır.

Ulusoy ve diğ., [24] Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesinde atık yemeklik yağlardan biyodizel üretmişlerdir. Araştırmacılar, ürettikleri biyodizeli TOFAŞ otomotiv fabrikasında bir dizel motorlu taşıtta şasi dinamometresi kullanarak test etmişlerdir. Testlerin sonucunda, biyodizel kullanımının 2 numaralı dizel yakıtına göre tekerlek gücünde %2,03'lük, tekerlek momentinde %3,35'lik, ivmelenme test sonuçlarında, 40 km/saat'ten 100 km/saat'e hızlanmada %7,32'lik, 60 km/saat'ten 100 km/saat'e hızlanmada %8,59'luk bir azalma meydana getirdiğini ifade etmişlerdir. Emisyon testlerinde ise biyodizel kullanımı ile CO, yanmamış HC, PM emisyonunda 2 numaralı dizel yakıtına göre sırasıyla %8,59, %30,66, %63,33 azalma olurken CO<sub>2</sub> emisyonunun %2,62, NO<sub>x</sub> emisyonunun %5,03 arttığını gözlemlemişlerdir. Yapılan testlerde biyodizel, 2 numaralı dizel yakıtına göre %2,43 daha az yakıt tüketimi sağlamıştır.

Usta yaptığı çalışmada [33], tütün tohumlarından yağ çıkarılması ve çıkarılan bu yağların transesterifikasyon yöntemi ile biyodizele dönüştürülmesini incelemiştir. Elde ettiği tütün yağı metil esterini ve (tütün yağı metil ester + fosil yakıt) karışımlarını ön yanma odalı, turboşarjlı, dört silindirli bir dizel motorda (Ford XLD 418T) kullanarak motor performans ve emisyon testleri yapmıştır. Testlerin sonucunda, en yüksek momenti tam yükte %82,5 fosil yakıt + %17,5 tütün soya yağı metil ester karışımı ile elde etmiştir. Maksimum moment değeri %100 fosil yakıt kullanımına göre %3,13 daha fazla çıkmıştır. Bu durum termik verimin %2,02 daha fazla olmasını sağlamıştır. Fakat bu değeri sadece tam yükte elde ederken kısmi yüklerde, %100 fosil yakıtının termik verimini daha yüksek bulmuştur. Usta, yaptığı emisyon testlerine göre, CO oranının en düşük olduğu seviyeyi %75 fosil yakıt + %25 tütün yağı metil ester karışımında, SO<sub>2</sub> oranını en düşük seviyeyi (-%45) %82,5 fosil yakıt

+ 17,5 tütün soya yağı metil esterinden elde etmiştir. NO<sub>x</sub> emisyonu tam yük testinde %5 atarken özellikle %50'lik kısmi yüklerde ihmal edilebilecek seviyede olduğunun belirtmiştir.

Genel olarak, biyodizelin oksijen içeriği; yanma bölgelerinde gerekli oksijeni sağlayarak, HC, CO ve is emisyonlarında önemli azalmalar sağlamaktadır. Özellikle PKDY'nın aromatik bileşikler ve kükürt içermesi is ve partikül emisyonlarının oluşmasına neden olmaktadır. Birçok araştırmacı [34–38] 2 numaralı dizel yakıtına eklenen aromatiklerin yüzdesi ile orantılı olarak partikül ve is (duman koyuluğu) emisyonlarında artış gözlemlemiştir. Biyodizelin hemen hemen hiç aromatik ve sülfür bileşiği içermemesi poliaromatik hidrokarbon (PAH) ve is emisyonlarında önemli azalmalar sağlamaktadır. Literatürde genel eğilim biyodizel ve karışımlarının kullanımı ile HC, CO ve is emisyonlarında önemli azalmalar sağlanır iken NO<sub>x</sub> emisyonlarında %5–20 oranında bir artış olduğu yönündedir [39–50]. Bununla birlikte bazı çalışmalarda biyodizel kullanımı ile NO<sub>x</sub> emisyonunda bir değişim olmadığı veya 2 numaralı dizel yakıtına göre daha düşük olduğu raporlanmıştır. Bazı araştırmacılarda biyodizel kullanımı ile NO<sub>x</sub> emisyonundaki artışa sebep olarak, biyodizelin yakıt özelliklerini göstermişlerdir. Signer ve diğ. [26] yakıtın yoğunluğundaki %3,5'lük artışın NO<sub>x</sub> emisyonunda %3–4 oranında artışa sebep olduğunu ifade etmiştir. Peterson ve diğ. [50] biyodizelin yapısındaki çift bağlı yağ asitleri ile ilişki olarak NO<sub>x</sub> emisyonlarında değişim gözlemlemiştir. Petrerson ve diğ. iyot sayısını 7,88 den 129,5 çıkardıklarında NO<sub>x</sub> emisyonlarında %29,3 artış tespit etmişlerdir. McCormick ve diğ. [51] yaptıkları çalışmada da Peterson ve arkadaşlarını destekleyecek nitelikte bulgular görmüşlerdir.

Dizel motorlarda egzoz emisyonları motor tipinin bir fonksiyonu olarak değişmektedir. Dizel motorlar yanma odası tasarımları temel alınarak iki temel kategoriye ayrılır; Direkt püskürtmeli (DP) ve Endirekt püskürtmeli (EDP) (Ön yanma odalı dizel motorlar vb. gibi). EDP dizel motorlarda yakıt, ana yanma odası ile irtibatlandırılmış ön yanma odasına püskürtülmektedir. EDP dizel motorlar, direkt püskürtmeli (DP) dizel motorlar ile karşılaştırıldığında, yakıt kalitesine bağımlı olmayan motorlar olarak dikkat çekmektedir. Aynı zamanda EDP dizel motorlar, karışım oluşumu bakımından DP motorlara nazaran daha homojen bir yapı

sergilediğinden, egzoz emisyonlarında iyileşme sağlamaktadır. EDP dizel motorların diğer önemli özellikleri de, DP dizel motorlara nazaran daha düşük tutuşma gecikmesine sahip olması, yanma hızının yüksek olması ve kontrollü yanma safhasının daha uzun olmasıdır. Bu durum gürültü emisyonlarında azalma sağlarken, yüksek hızlı dizel motorların gelişmesine olanak tanımaktadır. Bununla birlikte, ana yanma odası ile ön yanma odası arasındaki bağlantı kanalında meydana gelen ısı transferi kayıplarından dolayı EDP dizel motorlar, DP dizel motorlara oranla daha yüksek yakıt tüketimine sahiptir [2, 4, 52–54].

Giriş kısmında ifade edildiği gibi, biyodizel üretimindeki en büyük engel biyodizelin PKDY'a göre maliyetinin daha yüksek olmasıdır. Maliyetin düşürülmesi için ana madde olarak atık restaurant veya evsel kızartma yağların kullanılması öngörülmektedir. Aynı zamanda, atık yağların biyodizele dönüştürülmesi ile bu yağların yasadışı yollarla imhasının önüne geçilebilecektir. Bu durumlar göz önüne alınarak, bu çalışma için Kocaeli sınırları içerisindeki Uzay Gıda Frito-Lay Cips Fabrikası'ndan atık kızartma yağı temin edilmiştir. Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü Yakıt Laboratuvarında 80 litre hacmine sahip büyük bir proses kurularak atık yağ biyodizele dönüştürülmüştür. Dönüştürme işlemleri ile ilgili ayrıntılar 3'üncü kısımda verilmektedir. Ayrıca, EDP dizel motorların yakıt kalitesine bağımlı olmaması, egzoz emisyon seviyesinin DP motorlara göre daha düşük olması gibi temel iki kriter dikkate alınarak, bu çalışmada kullanılacak motor tipi olarak EDP dizel motor seçilmiştir. Bu çalışmanın amacı, atık palmye yağından üretilen biyodizel ve karışımlarını (B5, B20, B50) EDP bir dizel motorda performans, yanma ve emisyon karakterlerini tam, 60, 40, 20 Nm sabit yük şartlarında PKDY referans alarak karşılaştırmaktır.

### **3. ATIK BİTKİSEL YAĞDAN BİYODİZEL (METİL ESTER) ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİN BELİRLENMESİ**

Bitkisel ve hayvani yağların, katalizör eşliğinde monohidrik bir alkolle (metanol, etanol vb. gibi), tepkimeye sokulması sonucu elde edilen yağ asidi esterlerine biyodizel denilmektedir. Eğer biyodizel üretiminde alkol olarak metil alkol kullanıyor ise metil ester, etil alkol kullanılıyor ise etil ester kullanılan ana yağ kaynağından sonra yerini almaktadır. Ör; palmye yağı metil esteri, soya yağı etil esteri vb. gibi. Günümüzde biyodizel üretiminde ana madde olarak bitkisel yağlar, hayvansal yağlar, atık bitkisel (kızartma yağları vb. gibi) yağlar kullanılmaktadır. Biyodizelin yakıt özellikleri, kullanılan yağın yağ asidi zincir yapısına bağlı olarak değişmektedir. Ana yağ kaynağı yakıtın, setan sayısını, soğuk akış özelliklerini ve oksitlenme kararlılığını belirlemektedir. Örneğin; yüksek oranda doymuş bir donyağından üretilen biyodizelin donma noktası yüksek olmakta, bu da yakıtın soğuk akış özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Bununla birlikte bir dizel yakıtından istenen yüksek setan sayısı donyağından üretilen biyodizel ile elde edilebilmektedir. Biyodizel bir dizel motorunda saf halde ve petrol kökenli dizel yakıtı ile çeşitli oranlarda harmanlanarak kullanılabilir. Karışımdaki biyodizel yüzdesi "BXX" olarak ifade edilmektedir. Buradaki "XX" karışımda kullanılan biyodizel oranını göstermektedir. Örneğin; B20 oranında bir karışım, %20 biyodizel ile %80 petrol kökenli dizel yakıtını göstermektedir. B100 ise saf halde biyodizel kullanımını ifade etmektedir [55, 56].

Genellikle, bitkisel, hayvansal veya atık bitkisel-hayvansal yağları esterlerine dönüştürerek dizel motorunda kullanmaktır. Bitkisel, hayvansal veya atık bitkisel-hayvansal yağlardan ester üretimi farklı yöntemler kullanılarak gerçekleştirilebilir. Bitkisel ve hayvansal yağların dizel yakıtına dönüştürülmesinde genelde üç metot kullanılmaktadır. Bunlar, termal kraking (pyrolysis), mikro emülsiyonlama ve transesterifikasyon reaksiyonudur. Termal kraking yönteminde, atmosferik şartlarda yağa termik enerji uygulanarak kimyasal

değişim sağlanmaktadır. Trigliseridlerin termal kraking yöntemi kullanılarak ayrıştırılması birçok yapıda bileşikler oluşmasına neden olmaktadır. Bu bileşikler, alkanlar, alkenler, aromatikler ve karboksil asitlerden oluşabilmektedir. Örneğin; soya yağına termal kraking yöntemi uygulandığı zaman, bileşiği %79 karbon, %12 hidrojen olmaktadır. Aynı zamanda düşük viskozite ve yüksek setan sayılı bir yakıt elde edilmektedir [17]. Bununla birlikte, petrol kökenli yakıtların distilasyonuna benzeyen bu yöntemde, yakıtın içeriğindeki oksijen elimine edilmektedir. Böylece yakıt, oksijenli yakıt özelliğini kaybetmektedir. Ayrıca kül miktarı, karbon kalıntıları ve bulutlanma noktası kabul edilebilir seviyede olmamaktadır. Mikro emülsiyonlama yönteminde ise çeşitli solventler (metanol, etanol, 1-bütanol vb. gibi) kullanarak bitkisel yağın yüksek viskozitesi azaltılmakta, böylece elde edilen yakıt dizel motorda herhangi bir değişiklik yapılmadan kullanılabilir [9]. Fakat laboratuvar ölçekli çalışmalarda bu yöntemle elde edilen yakıtın tam yanma meydana getirmediği, yağlama yağının viskozitesini artırdığı, enjektör memesinde yapışkan maddelerin ve yanma odasında yüksek oranda karbon kalıntılarının oluşmasına neden olduğu gözlemlenmiştir [56]. Yağların esterlerine dönüştürülmesinde en dikkati çeken yöntem transesterifikasyon reaksiyonu (alkoliz) olmuştur. Ticari uygulamalarda en geçerli yöntemdir. Transesterifikasyon reaksiyonu, trigliseridlerin içeriğindeki ester ve gliserolün kolayca ayrıştırılabilmesi için bitkisel yağın bir alkolle kimyasal olarak reaksiyona girdirilmesidir. Transesterifikasyon reaksiyonunda, bir ester başka bir estere dönüşür. Pratikte, potasyum veya sodyum hidroksit gibi bazik bir katalizör, bitkisel ve hayvansal yağlardan hazırlanan gliserol tabanlı tri-esteri metil estere dönüştürmek için kullanılır ve ürünlerden biri de serbest gliseroldür [26]. Transesterifikasyon reaksiyonunda, yağdaki serbest asitler mümkün olduğunca alınmalı ve bunun yerine bir alkol bileşime girmelidir. Böylece yağdaki serbest yağ asitlerinin çoğunluğu sabuna ve suya dönüşecektir [57]. İlk transesterifikasyon yöntemiyle ester üretimi Haller ve Youssoufın [8] tarafından gerçekleştirilmiştir. Bunlar %2 hidrojen klorür katalizörlü metanol ile hindistancevizi yağını reaksiyona sokarak, yağ asidi metil esterlerinin (oleik asit, palmitik asit vb. gibi) bir karışımını elde etmişlerdir. Transesterifikasyon reaksiyonu; serbest yağ asidi oranı ve su içeriği, kullanılan alkolün kimyasal yapısı, katalizör tipi, reaksiyon sıcaklığı ve reaksiyon süresi gibi fonksiyonlardan etkilenmektedir. Transesterifikasyon reaksiyonu ile biyodizel üretimi bir defalık veya sürekli olabilir.

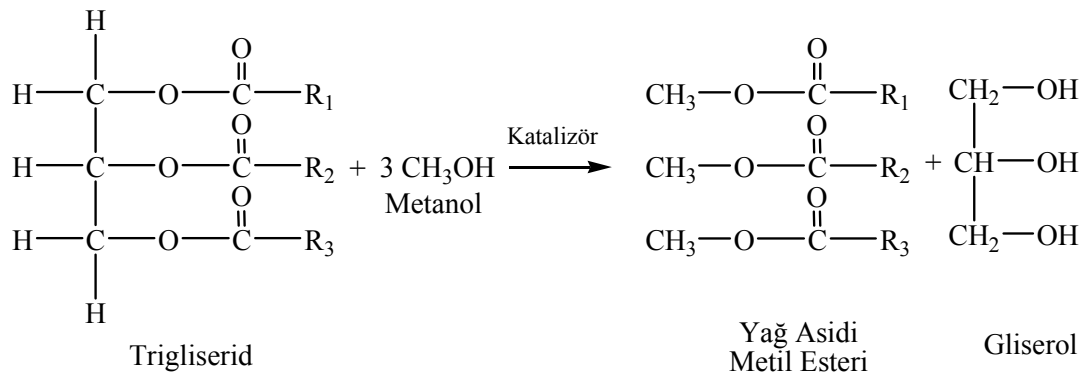
Genelde ticari amaçlı biyodizel üretim tesislerinde alkali katalizörlü sürekli transesterifikasyon reaksiyonu kullanılmaktadır. Transesterifikasyon sonucu elde edilen ürünlerin büyük bir oranı dizel motorlarında kullanılırken diğer eldeler çeşitli endüstriyel faaliyetlerde kullanılabilir [58].

Bitkisel yağların yağ esterlerine dönüşümü ile aşağıdaki amaçlar gerçekleştirilebilir;

- Yağdaki gliserol ayrıştırılması,
- Kaynama derecesinin, alevlenme noktasının, bulutlanma noktasının, viskozitesinin azaltılması,
- Elde edilen gliserolun kimya endüstrisinde, ara ürünlerinde sabun ve deterjan endüstrisinde kullanımı.

### 3.1. Biyodizel Üretiminde Reaksiyon Mekanizması

Transesterifikasyon yöntemi ile biyodizeli üretmek için mono-, di-, trigliserid tabanlı bitkisel veya hayvansal yağlar, metanol gibi bir alkolle kimyasal olarak reaksiyona tabi tutulmaktadır. Reaksiyonu hızlandırma için bir katalizör kullanılmaktadır. Reaksiyon ürünleri metil esterin bir karışımı ve maddi açıdan değerli bir ürün olan gliseroldur. Bu denkleme transesterifikasyon reaksiyonu denilmektedir. Şekil 3,1'de esterin, gliserolun kimyasal yapısı ve transesterifikasyon reaksiyonu gösterilmektedir.



R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub>: Yağ asitlerine ait karbon zincirlerini ifade etmektedir.

Şekil 3.1: Transesterifikasyon Reaksiyonu



Transesterifikasyon reaksiyonun stokiyometrik olarak tamamlanabilmesi için alkol-trigliserid molar oranı 3:1 olmalıdır. Stokiyometrik transesterifikasyon reaksiyonunda, 1 mol tri-di-mono gliserid ile 3 mol alkol reaksiyona girerek 3 mol yağ asidi esteri ile 1 mol gliserol oluşmaktadır [26].

### **3.2. Biyodizel Üretimine Etki Eden Temel Faktörler**

Ester üretimini etkileyen en önemli parametrelerden birisi alkol-trigliserid molar oranıdır. Transesterifikasyon reaksiyonunda molar oranı, ester dönüşümü ve esterin viskozitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu yüzden pratik uygulamalarda, reaksiyon eşitliğinin sağ tarafındaki ayrışmayı artırmak ve esterin viskozitesini azaltmak için teorik orandan daha fazla molar oranı seçilmesi gerekmektedir. Ayrıca molar oranı seçilen katalizör tipine göre farklılık göstermektedir. Bir asit katalizörlü reaksiyon için (soya yağı-bütül alkol reaksiyonu gibi) 30:1 molar oranına ihtiyaç duyulurken, aynı ester ürünü elde etmek için alkali katalizörlü reaksiyonda molar oranın 6:1 seçilmesi yeterli olmaktadır [31]. Alkali katalizörlü reaksiyonlarda 4,5–6:1 molar oranı rafine edilmiş bitkisel yağların transesterifikasyon reaksiyonunda memnun edici sonuçlar verirken, ana yağ kaynağı olarak atık bitkisel yağ kullanan reaksiyonlarda 4,5:1 molar oranı seçildiğinde iyi bir sonuç vermediği görülmüştür [59]. Serbest yağ asidi değeri %1'in altında olan atık bitkisel yağların transesterifikasyon reaksiyonunda maksimum ürünün elde edilebilmesi için 6:1 molar oranının seçilmesi gerekmektedir. Molar oranının çok yüksek seçilmesi ester ile gliserolün ayrışmasını engellemektedir. Genel olarak endüstriyel proseslerde 6:1 molar oranı seçilmekte ve %95–98 oranında ester dönüşümü sağlanmaktadır. Biyodizelin asit, peroksit, iyot sayısı ve sabunlaşması üzerine molar oranının etkisi bulunmamaktadır [60]. Bu özellikler transesterifikasyon reaksiyonunda kullanılan yağ kaynağına bağlı olarak değişmektedir. Aynı zamanda molar oranı esterlin yağ asidi zincirini değiştirecek bir etki de göstermemektedir. Birçok deneysel çalışma göstermiştir ki, yüksek molar oranlı reaksiyonlar çok daha kısa sürede ve daha yüksek oranda ester dönüşümü gerçekleştirmektedir [56]. Tomasevic ve Siler-Marinkovic [59], kızartma yağından biyodizel üretimi ile ilgili yaptıkları çalışmada molar oranın ve katalizörün esterleşmeye etkisini incelemişlerdir. Katalizör olarak %1,5, %1 ve %0,5 kütleli oranlarında NaOH ve KOH, 4,5:1, 6:1, 9:1 molar

oranlarında 25°C’de ve 30 dakika süresince ester dönüşümünü gözlemlemişlerdir. Bu çalışmanın sonucunda, molar oranın reaksiyon üzerine etkisinin katalizörden çok daha fazla olduğunu ifade etmişlerdir.

Transesterifikasyon reaksiyonunda metil, etil, propanol ve bütanol gibi kısa zincirli alkoller kullanılmaktadır. Bu alkoller arasında kinetik ve reaksiyon sonu ürünler açısından bazı farklılıklar vardır [61]. Canakci ve Van Gerpen [62], asidik katalizörlü reaksiyonlarda alkollerin etkisini incelemek için oda sıcaklığında metil alkollü sülfürik asit (%3) çözeltisi hazırlamışlardır. Bu çalışmanın sonucunda alkol tipinin asit katalizör reaksiyon üzerine etkisini Tablo 3.1’de verildiği gibi bulmuşlardır.

Tablo 3.1: Alkol tipinin ester dönüşümüne ve yoğunluğu üzerine etkisi [62]

Alkol Tipi	Kaynama Noktası (°C)	Reaksiyon Sıcaklığı (°C)	Ester Dönüşümü (%)	Elde Edilen Esterin Yoğunluğu
Metanol	65	60	87,8	0,8876
2-Propanol	82,4	75	92,9	0,8786
1-Bütanol	117	110	92,1	0,8782
Etanol	78,5	75	95,8	0,8814

Canakci ve Van Gerpen, alkol olarak 1-bütanol kullanılan reaksiyonda sıcaklığın en yüksek derecede olmasına rağmen, dönüşüm oranının beklenen seviyede olmamasını alkollün dallanmış yapıya sahip olması şeklinde yorumlamışlardır. Bir başka çalışmada, Freedman ve diğ., [63] metanol, etanol ve bütanol kullanarak 1 saatlik transesterifikasyon reaksiyonu sonucunda soya yağından %96-98 oranında değişen ester dönüşümleri sağlamışlardır. Araştırmacılar, daha sonra aynı miktarda metanol kullanarak pamuk yağından %93 oranında ester dönüşümü gerçekleştirmişlerdir. Freedman ve diğ. alkolün ester dönüşümünde etkisinin ihmal edilecek seviyede olduğunu görerek, reaksiyonda kullanılacak alkol tipinin seçiminde maliyet ve performansa bakılması gerekliliğini ifade etmişlerdir. Ticari uygulamalara bakıldığında ise genelde biyodizel üretiminde alkol olarak metanol ve etanol tercih edilmektedir. Metanol’ün etanol’den daha ucuz olması ticari kullanımını artırmaktadır [56]. Yalnız son zamanlarda, metanolün ticari ve endüstriyel faaliyetlerde çokça kullanılması bir önceki senelere nazaran fiyatını iki kat artırmıştır.

Transesterifikasyon reaksiyonunun hızını artırmak ve ürünleri iyileştirmek için genelde bir katalizör kullanılır. Transesterifikasyon reaksiyonu alkaliler, asitler veya enzimler tarafından katalize edilebilir. Genellikle asit katalizör olarak sülfürik, fosforik, hidroklorik ve organik sülfonik asitler; alkali katalizör olarak da NaOH, KOH, karbonatlar ve sodyum metoksit, sodyum etoksit, sodyum proksit gibi alk-oksitler kullanılmaktadır. Aynı zamanda lipitler de biyokatalizör olarak kullanılabilirler [9]. Günümüzde birçok araştırma merkezinde enzim katalizörlü reaksiyona yoğun bir ilgi bulunmaktadır. Asit katalizörlü transesterifikasyon reaksiyonu aynı orana sahip alkali katalizörlü reaksiyondan çok daha yavaştır. Alkol olarak metanol kullanılan bir testte, alkali katalizörlü reaksiyon aynı miktardaki asidik katalizörlü reaksiyona göre yaklaşık 4000 kat daha hızlı olduğu görülmüştür [64]. Bu yüzden rafine edilmiş ve ham yağların serbest yağ asidi düşük olduğundan asidik katalizör değil alkali katalizör kullanılmaktadır. Ticari uygulamalarda NaOH, KOH'a göre daha ucuz olduğundan tercih edilmektedir. Atık bitkisel veya hayvansal yağların serbest yağ asidi içeriği yüksek olduğundan asidik katalizörlü bir ön iyileştirme yapıldıktan sonra alkali katalizör kullanılabilir. Ayrıca alkali katalizörler, endüstriyel donanımlar üzerinde daha az aşındırıcı etki gösterdiğinden ticari uygulamalarda da tercih edilmektedir. Bununla beraber, alkali katalizörlü transesterifikasyon reaksiyonunun gerçekleşebilmesi için trigliseridler ve alkoller sudan arındırılmış olması gerekmektedir [56]. Çünkü su reaksiyonu kısmi olarak değiştirerek sabunlaştırmakta, katalizör sabun üretiminde harcanmakta ve katalitik verim azalmaktadır. Bunun yanında viskozite ve tortu oluşumunda artış olmakta, gliserolun ayrıştırılması zorlaşmaktadır. İsigur ve diğ., [65] aspir yağından ester üretimi ile ilgili yaptıkları çalışmada potasyum hidroksitin soydum hidroksite nazaran daha iyi sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir.

Reaksiyon sıcaklığı ester dönüşüm oranını önemli derecede etkilemektedir. Bununla birlikte, reaksiyon süresi yeterince uzatılırsa oda sıcaklığında da reaksiyon tamamlanabilmektedir. Kullanılan alkol ve yağa bağlı olarak reaksiyon farklı sıcaklıklarda gerçekleşebilir. Genelde reaksiyon sıcaklığı atmosferik şartlarda alkolün kaynama noktasına yakın bir sıcaklığa getirilir. Encinar ve diğ., [61] sıcaklığın reaksiyon üzerine etkisini incelemişlerdir. Reaksiyonu %1 kütleli oranda NaMeO, %15 oranda Metanol kullanarak, aynı reaksiyon süresinde ve sırasıyla 25,

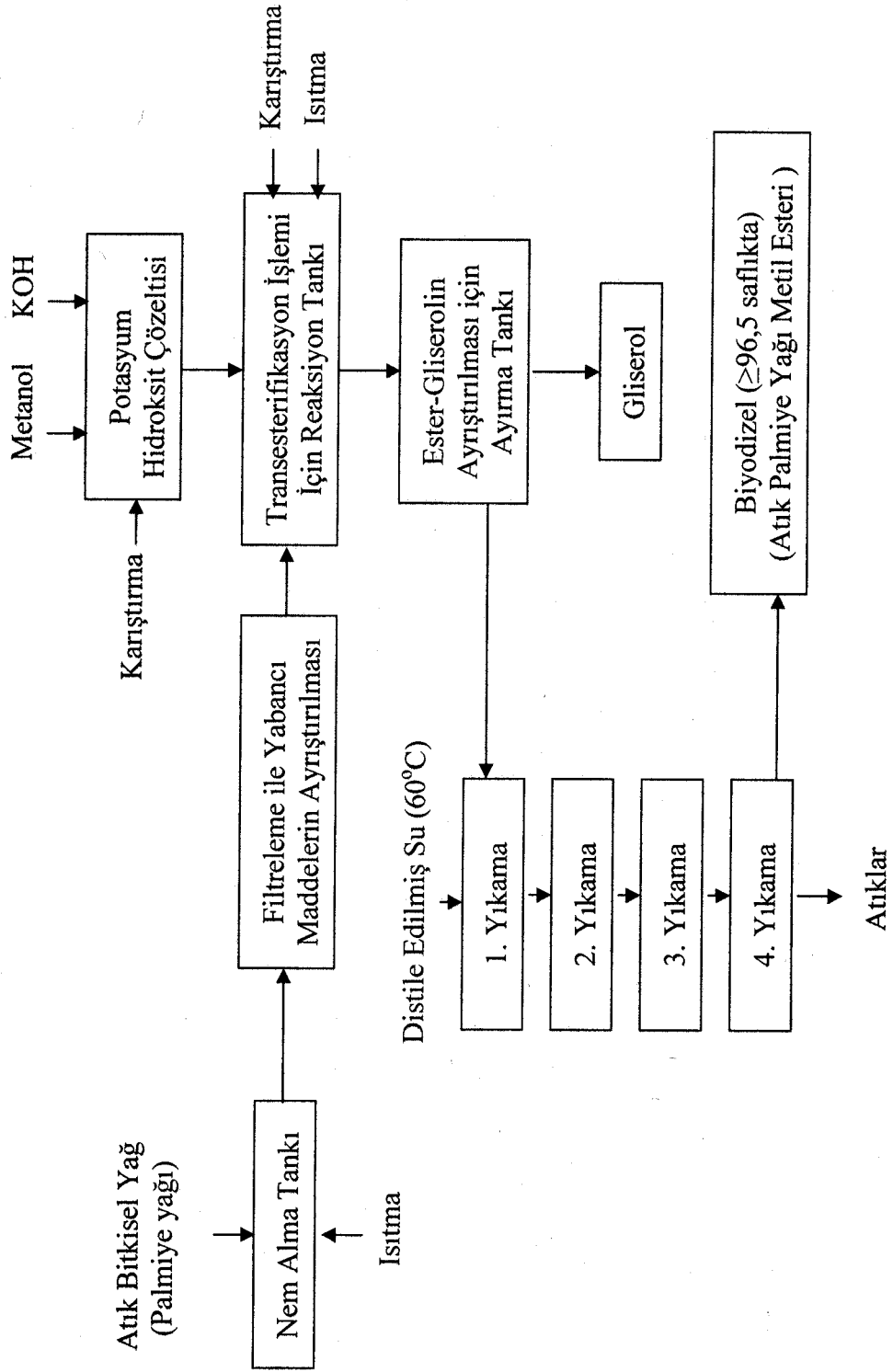
40, 55 ve 60°C’de gerçekleştirmişler ve sonuçta ester dönüşümü sırasıyla %86, %90, %93, %94 oranında değiştiğini gözlemlemişlerdir. Encinar ve diğ., yaptıkları testlere bağlı olarak reaksiyonun sıcaklığı arttıkça dönüşüm oranında da bir artış olduğunu ifade etmişlerdir.

Biyodizelin saflık derecesi yakıt özellikleri üzerinde önemli derecede etki göstermektedir. Özellikle gliserol miktarı ve yakıtta trigliseridlerin varlığı motor test uygulamalarında ciddi problemlere sebebiyet vermektedir. Esterin içerisinde kalan asidik katalizör motorun metal parçaları ile reaksiyona girerken, alkali katalizörler yanma sonrası katı kül parçacıklarının oluşmasına neden olmaktadır. Biyodizel üretiminde en önemli faktör, esterin sudan, alkolden, katalizörden ve gliseroldan tamamen arındırılmış olması gerekmektedir. Dünyadaki birçok akademik çalışmada gaz kromatografisi ve çeşitli analitik metotlar kullanılarak biyodizel saflaştırma çalışmaları yürütülmektedir. Bu çalışmalarda, biyodizelin içeriğindeki serbest yağ asidi, alkol, gliserol ve su en az seviyelere indirilerek, esterin %96,5 ve üzeri saflıkta olması sağlanmıştır. Reaksiyon sırasında kullanılan katalizörün tamamen esterden çıkartılması için genellikle ester su ile birkaç kez yıkanmaktadır. Karaosmanoğlu ve diğ. [66] transesterifikasyon reaksiyon ile elde edilen esteri çeşitli derecelerdeki saf su ile yıkayarak, yıkamanın saflaştırma üzerine etkisini incelemişlerdir. Ester ile gliserol fazlarının ayrışması için reaksiyon ayırma ünitesinde 5 saat bekletmişlerdir. Ayrıştırdıkları ham esteri, 1:1 oranında 50, 65, 80°C’deki saf su ile beş kez yıkamışlardır. Aynı zamanda yıkama sırasında reaksiyonu karıştırmanın etkisini görmek için 1 ve 2 yıkamayı karıştırma yapmadan, 3, 4 ve 5 yıkamayı karıştırarak saflık üzerine etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları testler sonucunda 50°C’deki yıkama ile en iyi ester dönüşümünü elde etmişlerdir.

### **3.3. Atık Bitkisel Yağın Biyodizele Dönüştürülmesinde Proses Adımlarının Belirlenmesi**

Bu çalışmanın bir amacı, Frito-Lay Cips Fabrikası’ndan alınan atık bitkisel yağı, Avrupa EN 14214 standardını sağlayacak düzeyde yağ asidi metil esterine dönüştürmektir. Daha sonra elde edilen metil esteri ön yanmalı odalı bir dizel motorunda kullanarak, yakıtın motor performans ve emisyon karakterleri üzerine

etkisini incelemektir. Bunun için küçük ölçekli reaksiyonda elde edilen veriler, büyük ölçekli transesterifikasyon ünitesine taşınacaktır. Büyük ölçekli transesterifikasyon ünitesi kurulmadan önce proses adımları ve tasarımı belirlenmeye çalışılmıştır. Şekil 3.2’de bu çalışmada kullanılacak atık bitkisel yağın metil esterine dönüştürülmesinde proses akış şeması gösterilmektedir. Avrupa Birliği 2002’de "Automotive Fuels – Fatty Acid Methyl Esters (FAME) for Diesel Engines – Requirements and Test Methods" başlıklı EN 14214 no’lu standardı yayımlamıştır. Aynı standart Türkiye’de de kabul edilerek yürürlüğe konmuştur. Standartın isminden de anlaşılacağı üzere standart metil alkol kullanımı ile sınırlandırılmaktadır. Bu yüzden bu çalışmada uygulanacak proses adımları metil alkol kullanımına göre tasarlanmıştır. Literatürde reaksiyon prosesinin 1 ile 50 bar arasındaki basınçlarda gerçekleşebileceği ifade edilmektedir [67]. Yüksek basınçlı sistem tasarımlarının kurulması maliyeti artırdığından, bu çalışmada yapılacak olan küçük ve büyük ölçekli prosesler atmosferik şartlarda gerçekleştirilecektir. Ticari uygulamalarda alkali katalizörlü reaksiyondan daha kısa sürede daha yüksek ürün elde edildiğinden tüm biyodizel üretim proseslerinde alkali katalizörlü reaksiyona geçiş adımları uygulanmaktadır [68]. Biyodizel üretiminde yağın içerisindeki serbest yağ asidi oranına göre transesterifikasyon reaksiyonun şeklinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada kullanılacak atık bitkisel yağın serbest asit değeri %1 altında çıkmıştır. Bu yüzden büyük ve küçük ölçekli proste direkt alkali katalizörlü reaksiyon uygulanmıştır.



Şekil 3.1: Atık bitkisel yağın metil esterine dönüştürülmesinde proses akış şeması

Reaksiyonda suyun varlığı, serbest yağ asidinin varlığından çok daha büyük negatif bir etkiye sahip olduğundan atık bitkisel yağın neminin alınması prosesin ilk adımı olacaktır. Transesterifikasyon reaksiyonuna geçişte atık bitkisel yağların içerisinde bulunan katı parçacıkların filtrelenmesi gerekmektedir. Filtreleme ile yabancı maddelerin temizlenmesi prosesin ikinci adımı olacaktır. Yağın hazırlanmasından sonra metil alkol-katalizör çözeltisi bir başka üniteye hazırlanarak, karışım için gerekli olan reaksiyon girdileri tamamlanmış olacaktır. Bu adımlardan sonra transesterifikasyon reaksiyonuna geçilecektir. Reaksiyon sonrasında metil ester tabakası ile gliserol tabakası arasında ayrışmalar gözükmemektedir. Bu iki tabakanın ayrıştırılma için karışımın ayrıştırma tankına alınması, proses adımlarından biri olacaktır. Bu iki tabaka ayrıştırıldıktan sonra esterin içerisindeki metanol ve sabun kalıntılarının ayrıştırılması da gerekmektedir. Biyodizelin saflık derecesi yakıt özelliklerini belirlemektedir. Ayrıca esterin içeriğindeki gliserol miktarı motor test uygulamalarında ciddi problemlere sebebiyet vermektedir. Bu yüzden esterin alkolden, katalizörden ve gliserolden tamamen ayrıştırılması için yıkama adımlarının gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Ham ester saflaştırılması reaksiyonun en son adımı olacaktır. Böylece elde edilecek yakıt ön yanma odalı bir dizel motorda herhangi bir değişiklik yapılmadan direkt olarak kullanılabilir.

### **3.4. Atık Bitkisel Yağın Küçük Ölçekli Olarak Metil Esterine Dönüştürülmesi**

Bu çalışmada, kullanılacak atık bitkisel yağ (palmiye yağı), Kocaeli Uzay Gıda (Frito-Lay) Cips Fabrikası'ndan temin edilmiştir. Atık bitkisel yağ fabrikadan alındıktan sonra filtre edilerek içerisinde bulunan yabancı içerikli maddeler çıkartılmıştır. Yağ üreticisi Türk Henkel Kimya Sanayi A.Ş. firması ile irtibata geçilerek rafine palmiye yağına ait özellikler elde edilmiştir. Yağ cips yapımında kullanıldıktan sonraki özellikleri ise Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yakıt Laboratuvarında tespit edilmiştir. Rafine ve atık palmiye yağının özellikleri Tablo 3.2'de verilmektedir.

Tablo 3.2: Rafine ve atık palmiye yağına ait özellikler

Ham palmiye yağına ait özellikler		Atık palmiye yağına ait özellikler	
Serbest yağ asidi	%0,03	Asit değeri	0,578 mg KOH/g
Peroksit değeri	0,0 meq O/Kg	Viskozitesi	40,348 mm <sup>2</sup> /sn
Kararlılık, 120°C	11,8 saat	Toplam gliserol	%10,4719 kütleli
Nem ve uçuculuk	%0,01	Molekül ağırlığı	847,28 g/gmol <sup>[59]</sup>
İyot sayısı	55,7 g I <sub>2</sub> /100g yağ	Yoğunluk	40°C, 904 m <sup>3</sup> /kg
Sabun içeriği	0,0 ppm	Renk	Açık sarı

<sup>[69]</sup> Molekül ağırlığı literatürden alınmıştır.

Tablo incelendiğinde rafine palmiye yağının iyot sayısının çok düşük olması yağın en dikkat çekici özelliği olarak gözükmektedir. Genel olarak bitkisel yağların iyot sayısı ile metil esterlerinin iyot sayısı birbirine çok yakındır. Türkiye’de üretilen pamuk, soya, ayçiçeği, mısır vb. gibi yağların iyot sayısı çok yüksektir. Bu yağlardan üretilen metil ester ile Avrupa EN 14214 standardını yakalamak çok zordur. Palmiye yağından üretilen metil ester ile diğer yağlardan üretilen metil esterlerin karıştırılması sonucunda Avrupa EN 14214 standartı yakalanabilecektir. Atık palmiye yağının viskozitesi çok yüksek çıkmıştır. Bitkisel yağların viskozitesi esterlerine göre daha yüksektir. Ester dönüşümü yapmanın temel nedenlerinden biri yağın viskozitesini, petrol kökenli dizel yakıtının viskozitesine benzetmektir. Atık palmiye yağının yoğunluğu normal oda şartlarındaki fiziksel özelliğinden dolayı belirlenememiştir. ASTM D 1298 metoduna göre atık palmiye yağının yoğunluğu ölçülmek için 20°C’de sıvı olması gerekmektedir. Fakat 20°C’de yağ yarı katı halde olduğundan 40°C sıcaklıkta yoğunluk değeri ölçülmüştür. Diğer bir önemli özellik rafine palmiye yağının asit bileşimidir. Tablo 3.3’de rafine palmiye yağına ait asit bileşimi verilmektedir.

Tablo 3.3 incelendiğinde rafine palmiye yağının toplam 11 yağ asidinden oluştuğu görülmektedir. Yağ asitlerinin analizinde %5 hata payı yağ üreticisi firma tarafından dikkate alınmıştır. Palmiye yağına egemen yağ asitleri palmitik asit (kütleli %36–41) ve oleik asit (kütleli %40–45)’dir. Genelde bitkisel yağlar yüksek oranda doymamıştır. Fakat palmiye yağında doymuşluk oranı %41,3–48,8 arasında iken doymamışlık oranı %51,2–58,7 arasındadır. Bu durum, palmiye yağının doymamışlık ve doymuşluk seviyesinin birbirine çok yakın olduğunu göstermektedir.



Palmiye yağının bu özelliği, metil esterinin soğuk akış özelliklerine negatif bir etki göstermesine, setan sayısının ise yüksek çıkmasına neden olmuştur. Transesterifikasyon reaksiyonuna geçiş için atık palmiye yağına ait değerler tespit edildikten sonra küçük ölçekli testlere başlanmıştır.

Tablo 3.3: Rafine palmiye yağının yağ asidi bileşimi

Yağ asidinin genel ismi	Karbon Sayısı	Yağ asidinin genel kimyasal yapısı	Molekül ağırlığı*	Bileşik oranları (± %5)
Laurik asit	C12:00	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{COOH}$	200,32	< 0,6
Miristik asit	C14:00	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOH}$	228,37	0,7–1,4
Palmitik asit	C16:00	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$	256,42	36–41
Palmitoleik asit	C16:01	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_5\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$	254,41	0,1–0,4
Stearik asit	C18:00	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$	284,48	3,5–5
Oleik asit	C18:01	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$	282,46	40–45
Linoleik asit	C18:02	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$	280,45	10–15
Linolenik asit	C18:03	$\text{CH}_3(\text{CH}_2\text{CH}=\text{CH})_3(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$	278,43	< 0,6
Araşidik asit	C20:00	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{18}\text{COOH}$	312,53	0,1–0,5
Gadoleik asit	C20:01	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{C}=\text{C}(\text{CH}_2)_9\text{COOH}$	310,50	0,1–0,5
Behenik asit	C22:00	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{20}\text{COOH}$	340,58	< 0,4

\*Asitlerin moleküler ağırlıkları SIGMA-ALDRICH firmasının katalogundan alınmıştır.

Küçük ölçekli test ünitesinde kullanılacak olan atık palmiye yağının içeriğindeki su miktarını ölçmek için 0,001 hassasiyetinde Ohaus marka terazi ile ölçüm yapılarak 300 gr numune alınmıştır. Numune yağ suyun kaynama derecesi olan 100°C’de 4 saat ısıtmaya tabi tutulmuştur. Her 30 dakikada numune dijital terazide tekrar ölçülerek buharlaşan su miktarı ölçülmüştür. 30 dakikalık ölçümler sonucunda herhangi bir kayıp tespit edilmemiştir. Atık palmiye yağının ölçümünde serbest yağ asidi %1’in altında çıkmıştır. Numune yağın asit değeri AOCS official Method CD 3A–63 test metodu kullanılarak ölçülmüştür. Ekler kısmında bu metoda ait bilgiler verilmektedir. Ölçüm sırasında 0,01 normalitede potasyum hidroksit (KOH) çözeltisi kullanılarak titrasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Ölçümler sonrasında atık palmiye yağının serbest asit değeri 0,578 mg KOH/g olarak bulunmuştur. Böylece tek adımlı, alkali katalizörlü reaksiyon gerçekleştirilebileceğine karar verilmiştir.

Büyük ölçekli transesterifikasyon reaksiyonuna geçmeden önce laboratuvar şartlarında küçük ölçekli bir tesis kurularak ana reaksiyon için temel girdiler tespit edilmeye çalışılmıştır. 600 gr numune yağa göre 6:1 molar oranında reaksiyon denklemi oluşturulmuştur. EN 14214 standardına göre alkol tipi olarak metanol seçilmiştir. Standarda uygun yakıt üretimini gerçekleştirebilmek için J.T. Baker firmasının %99,8 saflıktaki metanolu ticari bir firmadan satın alınmıştır. Atık palmiye yağı serbest yağ asidinin %1'in altında çıkması sonucu alkali katalizör olarak potasyum hidroksit seçilmiştir. Merck marka KOH katalizör ticari bir firmadan satın alınmıştır. Yağın %1 oranında KOH ile metil alkol çözelti haline gelinceye kadar IKA marka RCT model ısıtıcılı manyetik karıştırıcıda oda sıcaklığında karıştırılmıştır. Yağ 1000cc'lik üç yollu balona 600 gr yağ konularak 60°C'ye gelene kadar ısıtılmıştır. Daha sonra alkol katalizör çözeltisi yavaş yavaş reaksiyonu ilave edilmiştir. Transesterifikasyon reaksiyon süresi olarak 4 saat seçilmiştir. Reaksiyon sıcaklığı olarak metil alkolün kaynama derecesi olan 65°C'nin biraz daha altında (60°C) seçilmiştir. Tablo 3.4'de reaksiyon girdileri, Tablo 3.5'de reaksiyon çıktıları verilmektedir. Reaksiyon sonunda metil ester ile gliserolin ayrışması için reaksiyon ayırma ünitesinde 10 saat bekletilmiştir. Ayrıştırılan ham ester, 1:3 oranında 60°C'deki distile su ile dört kez yıkanmıştır. Yıkama esnasında ester ile su hafifçe çalkanarak, suyun tüm karışımla ile temas etmesi sağlanmıştır. Böylece, esterin içerisinde bulunan katalizör parçaları, alkol ve gliserol çıkarılarak ester saf hale getirilmiştir.

Tablo 3.4: Küçük ölçekli transesterifikasyon reaksiyon girdileri

<b>Reaksiyon Girdileri</b>	
Kullanılan atık bitkisel yağın kökeni	Palmiye Yağı
Yağın asit değeri	0,578 mg KOH/g
Seçilen molar oranı	6:1
Yağın moleküler ağırlığı	847,28 g/gmol <sup>[69]</sup>
Numune yağ miktarı	600 gr
Yağın mol sayısı	0,708 mol
Alkolün mol sayısı (CH <sub>3</sub> -OH)	4,248 mol
Alkolün moleküler ağırlığı	32,04 g/gmol
Alkol miktarı	136,28 gr
Katalizör miktarı (KOH) (yağın %1)	6 gr
Reaksiyona giren toplam miktar	742,28 gr
Reaksiyon süresi	4 saat
Reaksiyon sıcaklığı	60°C

Tablo 3.5: Küçük ölçekli transesterifikasyon reaksiyon çıktıları

<b>Reaksiyon Ürünleri</b>	
Reaksiyon sonu ester miktarı	602,9 gr
Reaksiyon sonu gliserol miktarı	129,032 gr
Reaksiyondan çıkan toplam miktar	731,932 gr
Buharlaşan alkol miktarı	10,348 gr
<b>Yıkama Sonrası Kalan Ester Miktarı</b>	
Yıkama kullanılan su	Saf Su
Yıkama sıcaklığı	60°C
1. Yıkama	594,1 gr
2. Yıkama	584,7 gr
3. Yıkama	579,5 gr
4. Yıkama	575,4 gr
Dönüşüm Oranı	%95,9
<b>Elde Edilen Esterin Özellikleri</b>	
Esterin toplam gliserol oranı	0,037
Esterin serbest gliserol oranı	0,016
Esterin viskozitesi	4,76 mm <sup>2</sup> /sn
Esterin yoğunluğu	873 kg/m <sup>3</sup>

### 3.5. Atık Bitkisel Yağın Büyük Ölçekli Olarak Metil Esterine Dönüştürülmesi

Avrupa standartlarına uygun kalitede biyodizel üretebilmek için daha önce proses adımları belirlenmiştir. Proses akış şeması göz önüne alınarak büyük ölçekli transesterifikasyon ünitesi kurulmuştur. Katalizörün ve alkolün aşındırıcı etkisi ve biyodizelin bakır, alüminyum, pirinç vb. gibi malzemelerle reaksiyona girdiği de bilindiği için tüm donanım elemanları paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Büyük ölçekli transesterifikasyon ünitesi üç ana kısımdan oluşmaktadır. Kimyasal dönüşümün gerçekleşeceği ana reaksiyon tankı, ester ile gliserolin ayrıştırılması ve yıkanması için ayrıştırma tankı, ester ve gliserolin depo edileceği depolama tankları sistemin temel elemanlarıdır. Büyük ölçekli reaksiyon ünitesinin ana kısımlarını oluşturmak için 100 dm<sup>3</sup>'lük paslanmaz çelik tanklar piyasadan temin edilmiştir. Reaksiyon kabının hacmi ve alkolün kaynama derecesi dikkate alınarak termostat ve rezistans özellikleri belirlenmiştir. Reaksiyon sıcaklığının kararlı halde tutabilmesi için piyasadan 2500 W'lık rezistans ve 300°C'ye kadar sıcaklık kontrolü yapabilen termostat satın alınmıştır. Ayrıca termostat ölçüğünü karışımın aşındırıcı etkisinden korumak için koruyucu tüp imal edilmiştir. Şekil 3.3'de büyük ölçekli proseste kullanılan sıcaklık kontrol elemanları gösterilmektedir.



Şekil 3.3: Büyük ölçekli proste kullanılan sıcaklık kontrol elemanları

Aynı şekilde reaksiyon kabının hacmi ve karıştırma hızı dikkate alınarak reaksiyonu karıştırma elemanları belirlenmiştir. Reaksiyonu belirli bir devirde sürekli bir şekilde karıştırabilmek için GAMAK marka AGM model 0,25 kW'lık elektrik motoru ve ABB marka ACS 141 model alternatif akım sürücüsü satın alınmıştır. Sürücü ile motor devrinin istenilen değerlerde tutulması sağlanmıştır. Şekil 3.4'de büyük ölçekli proste kullanılan karıştırma ve kontrol elemanları gösterilmektedir.



Şekil 3.4: Büyük ölçekli proste kullanılan karıştırma ve kontrol elemanları

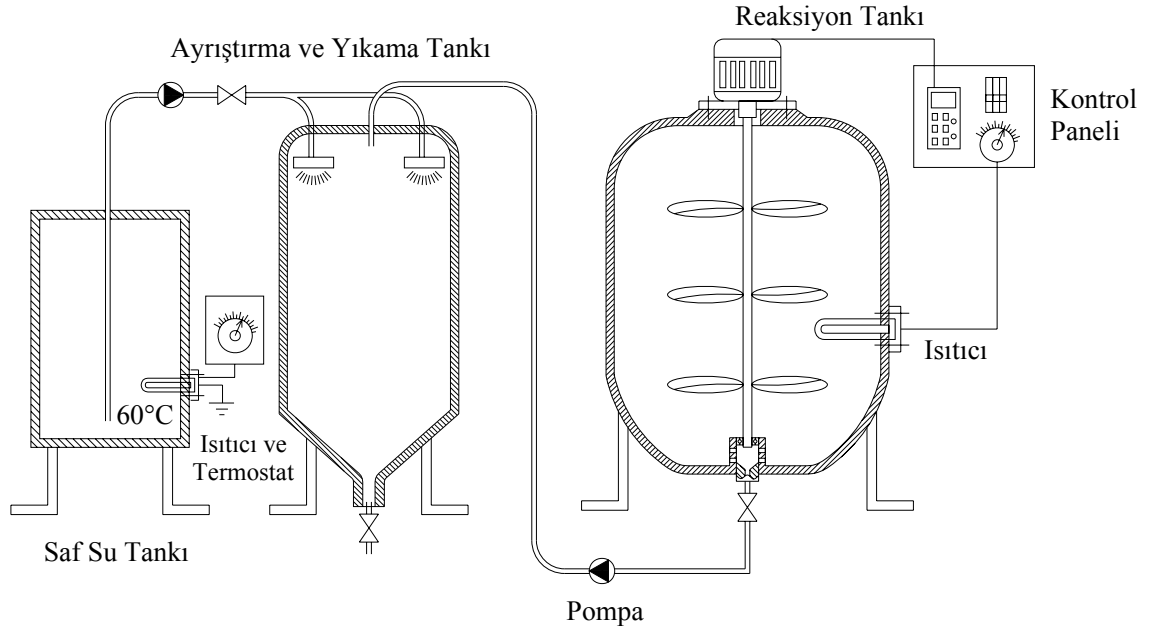
Büyük ölçekli transesterifikasyon ünitesi Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü Motor Test Laboratuvarında kurulmuştur. Sistem parçalarının imalatı ve montajı aynı bölümün Mekanik Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Reaksiyon tankında kullanılan karıştırıcının ana mili ve kanatçıkları elektrik motoruna göre imal edilmiştir. Ana milin üzerindeki kanatçıklar birbirine ters bakan yönlerde imal edilerek türbülansın artırılması hedeflenmiştir. Böylece reaksiyonun her noktasında karışımın gerçekleşebileceği düşünülmüştür. Şekil 3.5’de büyük ölçekli prosesin ana reaksiyon tankı ve kontrol paneli gösterilmektedir.



Şekil 3.5: Büyük ölçekli prosesin ana reaksiyon tankı ve kontrol paneli

Büyük ölçekli proses kurulduktan sonra termostat, ASTM sertifikalı termometre ile kalibre edilmiştir. Aynı şekilde motor devri  $\pm 3$  hata payı olan optik takometre ile kalibre edilerek hata payı belirlenmiştir. Bu analizler temel alınarak motor devri ve reaksiyon sıcaklığı sabitlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca tüm reaksiyon süresince karışım sıcaklığı K tipi sıcaklık ölçer ile de kontrol edilmiştir. Şekil 3.6’da büyük

ölçekli proses şeması gösterilmektedir. Bu aşamalar gerçekleştirildikten sonra büyük ölçekli testlere başlanmıştır.



Şekil 3.6: Büyük ölçekli proses şeması

Büyük ölçekli proste gerçekleşecek alkali katalizörlü reaksiyon girdileri literatüre göre belirlenmiştir. Birçok çalışmada transesterifikasyon reaksiyonunda maksimum ürünün elde edilebilmesi için molar oranın 6:1, katalizör miktarı yağın %1 olması gerektiği ifade edilmiştir [21, 23, 31, 56, 60, 69, 70]. Bu yüzden, reaksiyon girdileri literatür esas alarak hazırlanmıştır. Büyük ölçekli prostedeki reaksiyon 50000 gr atık palmye yağına göre düzenlenmiştir.

Atık palmye yağının (Palmitik asit + Oleik asit = 847,28 g/gmol) mol sayısı

$$n = \frac{m}{M_A} = \frac{50000}{847,28} = 59,01 \text{ mol (Atık palmye yağı) olarak bulunmuştur.}$$

Daha sonra 59,01 mol atık palmye yağına göre, reaksiyon girdilerinin miktarları hesaplanmıştır. Reaksiyon %100 fazla alkol kullanılarak, alkol-trigliserid molar oranı 6:1 olarak alındığından;

$\text{CH}_3\text{-OH} = 32,04 \text{ g/gmol}$

$59,01 * 6 = 354,06 \text{ mol (CH}_3\text{-OH)} \Rightarrow 354,06 * 32,04 = 11344,0824 \text{ gr metil alkol}$

reaksiyona girmesi gerektiği hesaplanmıştır. Katalizör olarak yağın %1 oranında 500 gr KOH kullanılmıştır. Şekil 3.7’de ham madde olarak kullanılan atık palmiye yağı ve üretilen biyodizelin resmi verilmektedir.



Şekil 3.7: Ham madde olarak kullanılan atık palmiye yağı ve üretilen biyodizel

### **3.6. Motor Deneylerinde Kullanılacak Yakıtların Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri**

Büyük ölçekli biyodizel üretimi gerçekleştirildikten sonra, biyodizelin yağ asit bileşikleri Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Çevre Mühendisliği Bölümünde analiz edilmiştir. Tablo 3.6’da analiz sonuçları verilmektedir. Bu değerler kullanılarak biyodizelin kapalı formülü ve molekül ağırlığı hesap edilmiştir. PKDY’nın kapalı formülü ve molekül ağırlığı, TÜPRAŞ’ın TS 3082 EN 590 standardına göre üretimini yaptığı motorin için ortalama değerlerden hesaplanmıştır. Biyodizelin ve PKDY’nın yakıt özellikleri ise TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsü tarafından tespit

edilmiştir. Tablo 3.7’de TÜBİTAK tarafından yapılan analiz sonuçları ve ölçülen değerlerin Avrupa - ABD’deki biyodizel standart değerleri verilmektedir.

Tablo 3.6: Biyodizelin yağ asidi bileşimi

Yağ asidi metil esterinin genel ismi	Yağ asidinin genel kimyasal yapısı	Molekül ağırlığı	Bileşik oranları
Miristik asit metil esteri	$C_{15}H_{30}O_2$	242,410	1,01
Palmitik asit metil esteri	$C_{17}H_{34}O_2$	270,457	39
Palmitoleik asit metil esteri	$C_{17}H_{32}O_2$	268,440	0,2
Stearik asit metil esteri	$C_{19}H_{38}O_2$	298,511	4,3
Oleik asit metil esteri	$C_{19}H_{36}O_2$	296,495	43,69
Linoleik asit metil esteri	$C_{19}H_{34}O_2$	294,479	10,55
Linolenik asit metil esteri	$C_{19}H_{32}O_2$	292,463	0,16
Araşidik asit metil esteri	$C_{21}H_{42}O_2$	326,560	0,39
Gadoleik asit metil esteri	$C_{21}H_{40}O_2$	324,550	0,16

C	H	O	MA	Yüzde	C	H	MA
15	30	2	242,410	1,01	0,1515	0,303	2,448341
17	34	2	270,457	39	6,6300	13,26	105,47823
17	32	2	268,440	0,2	0,0340	0,0640	0,53688
19	38	2	298,511	4,3	0,8170	1,6340	12,835973
19	36	2	296,495	43,69	8,3011	15,7284	129,53867
19	34	2	294,479	10,55	2,0045	3,587	31,067535
19	32	2	292,463	0,16	0,0304	0,0512	0,4679408
21	42	2	326,560	0,39	0,0819	0,1638	1,273584
21	40	2	324,550	0,16	0,0336	0,064	0,51928
TOPLAM				99,46	18,08	34,86	284,16643

Biyodizelin Kapalı Formülü:  $C_{18,08}H_{34,86}O_2$

Biyodizelin Molekül Ağırlığı: 284,17 g/mol



Tablo 3.7: Motor testlerinde kullanılan yakıtların fiziksel ve kimyasal özellikleri

Özellik	Birim	EU	USA	Biyodizel	PKDY
		EN 14214	ASTM D6751-06		
Yakıtın kapalı formülü	-	-	-	$C_{18,08}H_{34,86}O_2$	$C_{14,16}H_{25,21}$
Ortalama molekül ağırlığı	g/mol	-	-	284,17	195,5
Alt ısııl değer	kJ/kg	-	-	38730	42930
Yoğunluk	kg/m <sup>3</sup> , 15°C	860-900	-	875	840,3
Kinematik viskozite	mm <sup>2</sup> /sn, 40°C	3,5-5,0	1,9-6,0	4,401	3,177
Parlama noktası	°C	120 min	130 min	70,6	61,5
Sülfatlanmış kül içeriği	% kütleselel	0,02 maks	0,02 maks	0,0004	0,0015
Soğuk filtre tıkanma noktası	°C	-	-	+10	-14
Kükürt	mg/kg	10 maks	50 maks	82	4800
Karbon kalıntısı	% kütleselel	0,30 maks	0,050 maks	0,0004	0,067
Setan sayısı	-	51 min	47 min	60,4	56,5
Partikül madde	mg/kg	24 maks	-	9,03	4,14
Bakır şerit korozyonu	3 saat, 50°C	No.1 maks	No.3 maks	No.1A	No.1A
Oksitlenme kararlılığı	Saat, 110°C	6,0 min	-	10,1	-
Su	mg/kg	500 maks		2064,34	159,05
Asit değeri	mg KOH/g	0,50 maks	0,50 maks	0,15	-
İyot sayısı	-	120 maks	-	62	-
Monoglisericid içeriği	%(m/m)	0,8 maks	-	<0,26	-
Diglisericid içeriği	%(m/m)	0,2 maks	-	0,05	-
Triglisericid içeriği	%(m/m)	0,2 maks	-	<0,04	-
Serbest gliserol	% kütleselel	0,02 maks	0,02 maks	0,01	-
Toplam gliserol	% kütleselel	0,25 maks	0,24 maks	0,06	-
Ester içeriği	%	96,5 min	-	96,5	-
Linolenik asit metil esteri	%(m/m)	12 maks	-	0,3	
Fosfor içeriği	mg/kg	10 maks	10 maks	2,9	-
1.Grup Metaller (Na + K)	mg/kg	5 maks	5 maks	2,5	-
2.Grup Metaller (Ca + Mg)	mg/kg	5 maks	-	<1	-
Polisiklik Aromatik HC	% kütleselel	-	-	-	4,6
Destilasyon					
İlk kaynama noktası	°C	-	-	331	164,7
%90 elde edilen sıcaklık	°C	-	360 maks	348	351,1

### **3.7. Biyodizelin İnsan Sağlığı Üzerine Etkisi (Toksik Etkisi):**

Bir yakıtın çevre üzerine etkisi egzoz emisyonları açısından incelendiği gibi insan sağlığı üzerine etkisi toksik etkisi açısından incelenmektedir. Bunu ifade etmek için toksik etkisi terimi kullanılmaktadır. B20 ve B100 dizel yakıtı için yapılan testler göstermiştir ki biyodizel, PKDY'a göre çok daha az toksik etkisi göstermektedir. Biyodizel kullanımı ile PAH, nitratlı polisiklik aromatik hidrokarbon (nPAH) emisyonlarının önemli bir oranda azaldığı görülmüştür. PAH ve nPAH bileşikleri kanser oluşumunda potansiyel bileşikler olarak tanımlanmaktadır. Petrol ve petrol türevleri olan PAH'lar, petrol dökülmesi ve fosil yakıtlarının tamamen yanmaması sonucu çevreye atılan, yaygın organik kirleticilerdir. PAH'ların çoğu çevrede uzun süre kalmaları ve birikimleri sonucu, çevre kirlenmesine sebep olmakta ve biyolojik dengeyi önemli ölçüde etkilemektedir [71]. Biyodizel bileşiminde aromatik içermediği için biyodizel kullanımı ile PAH emisyonları %75–85 oranında, nPAH emisyonları da %90 oranında azalma göstermektedir [48].

### **3.8. Otomotiv Firmalarının Biyodizel Kullanımı ile ilgili Garantileri**

Biyodizelin alternatif yakıtlar arasındaki yerini alması, motor firmalarının motorlarında biyodizel kullanılabilirliğinin garantisini verebilmesine bağlıdır. Bununla birlikte, gelişmiş ülkelerde genelde motor firmaları yakıttan (motorin, biyodizel vb. gibi) kaynaklanan hasarı karşılamamaktadır. Yakıt üreticileri veya dağıtıcıları sattıkları yakıtın standartlarda olmaması durumunda hasarı karşılamaktadır. EMA'nın genel görüşü göre motorine %5 oranında biyodizel karıştırılması tüm motorlar için (stasyoner, sanayi ve trafikteki araçlar) kabul edilebilir bir seviyedir. Fakat daha yüksek karışımların üretici firma tarafından değerlendirilmesi gerekmektedir. Ford Motor %5'e kadar olan karışımların dizel motorlarında kullanılabilirliğinin garantisini vermektedir. Ford Motor internet üzerinden yaptığı açıklamada kullanılacak yağ asidi metil esterlerinin hem EN 14214 hem de ASTM D 6751 standartlarını karşılamasını gerektiğini ifade etmiştir. %5'in üzerinde kullanılmamasını yakıtın depolama problemlerini, karbon çökeltisi oluşumunu, bazı metallere zarar verdiği vb. gibi unsurları sıralayarak kullanımını sınırlamıştır [72]. Ford firmasının belirttiği unsurlar yakıtın bilinen problemleridir ve üzerindeki

araştırmalar yoğun olarak sürmektedir. Amerikan Volkswagen şirketi özellikle tarım amaçlı kullanılan tüm turbo direkt püskürtmeli dizel motorlarında %5 oranında biyodizel kullanımının garantisini vermiştir. şirket yaptığı açıklamada ASTM standardı dışında biyodizel kullanılması durumunda motorda meydana gelen hasarları karşılamayacaklarını ifade etmiştir [73]. Caterpillar motor üreticisi, 3046, 3116, 3126, 3176, 3196, 3208, 3306, C-9, C-10, C-12, 3406, C-15, C-16, 3456, 3408, 3412, 3500 serisi, 3600 serisi, CM20, CM25 ve CM32 model motorlarında ASTM D6751 veya DIN 51606 standartlarına uygun biyodizellerin kullanımına garanti vermiştir. Caterpillar diğer motor üreticileri gibi petrol kökenli dizel yakıtına %5'e kadar biyodizel katılımına müsaade etmektedir. Caterpillar firma yetkilileri biyodizel karışımları kullanan müşterilerine bazı tavsiyelerde bulunmaktadır. Bunlar; belirli aralıklara motorun yağ analizi yapmalarını, harman kullanımında %5-7 arasında bir güç kaybı yaşanabileceğini, hava sıcaklığının çok düşük olduğu durumlarda %100 motorin kullanılması gerekliliği gibi tavsiyelerdir [74]. John Deere tüm traktör motorlarında %5 oranına kadar biyodizel kullanımının garantisini vermiştir. Yine diğer firmalarda açıklamalarında olduğu gibi kullanılacak biyodizeller ASTM veya DIN standartlarına uygun olmalıdır. John Deere firması internet üzerinden yaptığı açıklamada herhangi bir şekilde yağın direkt olarak kullanılmasının kabul edilemeyeceğini ifade etmiştir. John Deere firmasının biyodizel karışımı kullanan müşterilerine diğer firmalarda olduğu gibi bazı tavsiyeleri vardır. Bunlar bir miktar güç kaybının yaşanabileceği, yakıt püskürtme sisteminde korozyon oluşabileceği, filtrelerin tıkanabileceği vb. gibi tavsiyelerdir [75]. Cummins motor firması yaptığı açıklamada biyodizel kullanan müşterilerine herhangi bir garanti sözü vermemektedir. Firma yetkilileri sadece %5 yakıt harmanın kullanabilirliğini ifade etmektedir. International kamyon ve motor şirketi %5 kadar yakıt harmanlarının motorlarında kullanılabilirdiğinin garantisini vereceğini açıklamıştır. Firma yetkilileri müşterilerine %100 biyodizel kullanımını tavsiye etmemektedir [76]. Tüm firmalarda dikkati çeken durumları şöyle özetleyebilirim;

- Kullanılacak biyodizel ASTM veya DIN standartlarına uygun olmalıdır.
- En fazla %5 yakıt harmanlarına kadar parça ve işçilik garantisi verilmektedir.
- %20 oranına kadar kullanımda doğacak parça ve işçilik garantisi verilmemekte, fakat kullanımının mümkün olduğu ifade edilmektedir.

## 4. DENEYSEL METARYEL VE METOTLAR

### 4.1. Deney Materyalleri ve Düzeneğin Hazırlanması

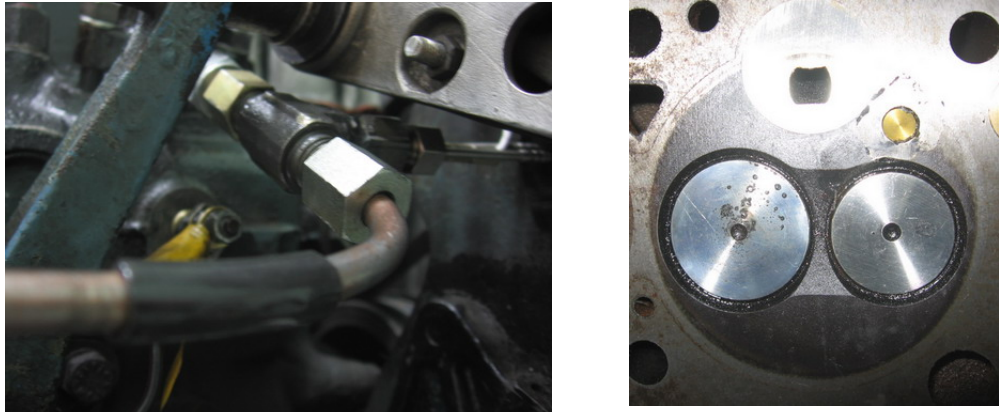
Deneyle, dört zamanlı, dört silindirli, doğal emişli, ön yanma odalı BMC marka bir dizel motorda gerçekleştirilmiştir. Motorun yakıt sistemi; besleme pompası, yakıt filtresi, yakıt hattı boruları, distribütör tipi yüksek basınç pompası ve delikli tip enjektörlerden oluşmaktadır. Deneyde kullanılan dizel motorunun fabrika tanımlı teknik özellikleri Tablo 4.1’de verilmektedir. Tablo verileri BMC taşıt katalogundan alınmıştır.

Tablo 4.1: Deneyde kullanılan dizel motorunun teknik özellikleri [77]

Motor	1,8 VD Dizel BMC
Yanma Odası Şekli	Ön Yanma Odalı
Tipi	4 zamanlı, su soğutmalı
Silindir Sayısı	4
Silindir Çapı	80,26 mm
Strok	88,9 mm
Sıkıştırma Oranı	21,47: 1
Püskürtme Pompası	Mekanik regülâtörlü, Distribütör pompa
Püskürtme basıncı	130 bar
Enjektör Delik Çapı	0,2 mm
Maksimum Güç	38,8 kW / 4250 dev/dak
Azami Moment	105,5 Nm / 2400 dev/dak
Püskürtme Sırası	1-3-4-2
Kuru Ağırlık	181,43 kg (Volan, Alternatör ve Marş motoru dahil)
Rölanti Devri	650-700 dev/dak

Motoru test şartlarına hazırlamak için silindir cidarları, piston yüzeyleri, segmanlar, silindir kapağı, enjektör yuvaları vb. gibi motor parçaları ve kısımlar kontrol edilmiştir. Gerekli görülen parçalar, fabrika montaj değerleri (cıvata sıkma momentleri, sentil değeri vb. gibi) esas alınarak değiştirilmiştir. Kritik üst ölü nokta bilgisi için, birinci silindirdeki pistonun çıkacağı maksimum nokta silindir kapağı

açıkken tespit edilmiş ve bu nokta krank kasnağı üzerine işaretlenmiştir. Silindir basıncını ölçmek için Kistler marka 6061B model su soğutmalı piezo kristalli basınç algılayıcısı yanma odasının merkezine yerleştirilmiştir. Basınç algılayıcısı test motorunun silindir kapağı üzerine, üretici firmanın önerdiği şekilde montaj edilmiştir. Ekler kısmında silindir basınç algılayıcısına ait teknik özellikler verilmektedir. Silindir basınç algılayıcısının kalibrasyonu üretici firma tarafından yapılmış ve algılayıcı kalibrasyon sertifikası ile satın alınmıştır. Silindir kapağı yerine montaj edildikten sonra emme ve egzoz supap ayarı, fabrika sentil (0,25) değeri esas alınarak motor soğukken ve ısındıktan sonra yapılmıştır. Yakıt hattındaki contalar ve yakıt filtresi yenilenmiştir. Enjektör açılma basınçları (130 bar), analog göstergeli basınçölçer ile kontrol edilmiştir. Yakıt hattı basıncını tespit etmek için birinci silindirin yakıt hattı üzerine AVL marka 8QP500c model kuvars kristalli basınç algılayıcısı monte edilmiştir. Ekler kısmında yakıt hattı basınç algılayıcısına ait teknik özellikler verilmektedir. Motor deney şartlarına hazırlanırken, fabrika değerleri dışında herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Şekil 4.1’de silindir ve yakıt hattı basınç algılayıcısının motor üzerindeki yerleri gösterilmektedir.



Şekil 4.1: Basınç algılayıcılarının motor üzerindeki yeri

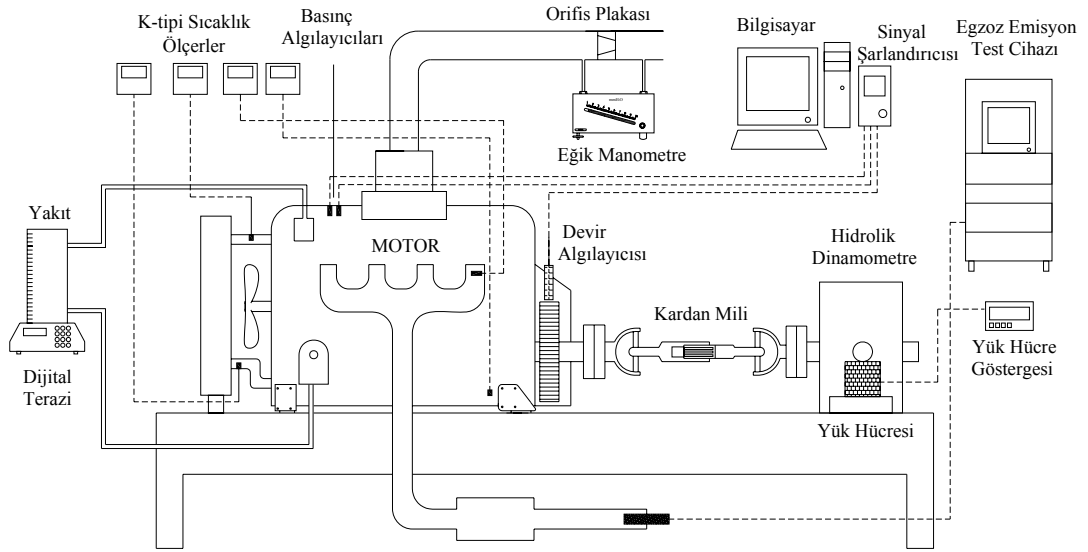
Deney test düzeneğinin montajına motorun test sehпасına alınmasına ile başlanmıştır. Motorun yüklenmesi için Motosan marka hidrolik dinamometre test sistemine monte edilmiştir. Motorun yüklenmesi anındaki değerler, 1 gr hassasiyetinde, 0–200 kg aralığında ölçüm yapabilen, dijital göstergeli Esit marka SP 200 model yük hücresi kullanılarak okunmuştur. Yük hücresinin kalibrasyon eğrisi ekler kısmında verilmektedir. Krank açısını (KA) belirlemek için kullanılan

manyetik devir algılayıcısı, montaj sırasında tespit edilen referans noktaya (kritik üst ölü nokta) göre gerilim üretmesi sağlanmıştır. Üretilen gerilim bir sinüs sinyali olduğundan, bir sinyal şartlandırıcı kullanılarak filtrelenmiştir. Filtrelenen sinyaller, LabVIEW bilgisayar yazılımında oluşturulan arayüz ile KA cinsine dönüştürülmüştür. Basınç algılayıcılarından gelen sinyaller, Kistler 5015A 1000 model sinyal şartlandırıcı, Advantech PCI 1716 çok fonksiyonlu veri toplama kartı kullanılarak bilgisayara aktarılmıştır. LabVIEW bilgisayar yazılımı kullanılarak da işlenmiştir. Yakıt tüketimi 1 gr hassasiyetli dijital göstergeli CAS marka SW-1 model terazi ile ölçülmüştür. Yakıt tüketim zamanını belirlemek için dijital süreölçer kullanılmıştır. Motorun yakıt deposu yerine, başka bir yakıt deposu terazi üzerine yerleştirilmiş ve borular yardımıyla yakıt hattına bağlanmıştır. Şekil 4.2’de deney tesisatının resmi gösterilmektedir.



Şekil 4.2: Deney tesisatı

Hava tüketimini ölçmek için, emme manifoldu hattına ISO 5167 (1980) standardına uygun orifis çapı 45 mm olan, flanşlı-keskin köşeli tip orifis plakası yerleştirilmiştir. Orifis plakasının giriş ve çıkış basınç farkını ölçmek için 0,1 mmH<sub>2</sub>O hassasiyetinde, 0–70 mmH<sub>2</sub>O çalışma aralığında ölçüm yapabilen Dwyer marka 41–600 model eğik manometre kullanılmıştır. Motor sıcaklıkları, tek hissedici girişli, NiCr-Ni elemanlı K tipi dijital göstergeli sıcaklık ölçerler kullanılarak belirlenmiştir. Dijital sıcaklık ölçerler 1°C hassasiyetli olup, 0–1200°C sıcaklık aralığında ölçüm yapabilmektedir. Dijital sıcaklık ölçerlerine ait kalibrasyon eğrileri ekler kısmında verilmektedir. Dijital sıcaklık ölçer ile belirlenen sıcaklıklar; motor yağı, egzoz, yakıt, ortam, egzoz borusu yüzeyi, radyatör giriş ve çıkış sıcaklığıdır. Ayrıca, emisyon numunelerinin alındığı noktadaki egzoz akışkanlarının sıcaklığı, egzoz emisyon test cihazına bulunan dijital sıcaklık ölçer ile belirlenmiştir. Bağıl nem ve ortam sıcaklığını ölçmek için NTC termistörlü, ±1°C hassasiyetinde, -5 ile +65°C sıcaklık aralığında ölçüm yapabilen, dijital göstergeli, Meitav marka M4000 model cihaz kullanılmıştır. Ortam basıncını ölçmek için analog göstergeli barometre kullanılmıştır. Motor test düzeneği temel olarak ön yanmalı dizel motor, hidrolik dinamometre, şasi ünitesi, yakıt terazisi, sıcaklık ölçerler, basınç algılayıcıları, devir algılayıcısı, veri toplama ünitesi ve egzoz emisyon test cihazlarından oluşmaktadır. Şekil 4.3’de motor test düzeneğinin şematik görünüşü verilmektedir.



Şekil 4.3: Motor test düzeneğinin şematik görünüşü

Egzoz emisyon ölçümlerinde CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, HC ve hava fazlalık katsayısını ölçmek için infrared ölçüm sistemine sahip Bilsa marka MOD 500 model cihaz, NO<sub>x</sub> değerlerini ölçmek için elektro kimyasal ölçüm sistemine sahip Kane-May Quintox marka KM9006 model analiz cihazı ve duman koyuluğunu ölçmek için Bosch marka RTM 430 model opasimetre kullanılmıştır. Egzoz emisyon ölçüm hattında ısı kayıplarını ve yanmamış partiküllerin yüzeyde yoğunlaşmasını önlemek için egzoz hattı izole edilmiştir. Ayrıca egzoz hattındaki biriken suyu almak için hatta su toplayıcı hazne ilave edilmiştir.

#### **4.2. Deneysel Hazırlık ve Deneyler**

Hem PKDY hem de biyodizel testleri, motorda herhangi bir değişiklik yapılmadan gerçekleştirilmiştir. Deneylere başlamadan önce motor yağ ve radyatör su seviyesi kontrol edilmiştir. Yine her testten önce egzoz emisyon test cihazlarının filtrelerinin temizliği yapılmış ve yük hücresi göstergesi, eğik manometre sıvısı, emisyon cihazlarının göstergeleri sıfırlanmıştır. Motor kararlılığını tespit etmek için motor yağ ve egzoz sıcaklığındaki değişim gözlemlenmiştir. Motorun ilk çalışma anından yaklaşık 20 dakika sonra motor yağ sıcaklığı 60-70°C, egzoz sıcaklığı 120-130°C ulaştığında motorun kararlı hale geldiği belirlenmiştir. Deneysel çalışma boyunca tüm testler motor kararlı hale geldikten sonra gerçekleştirilmiştir. Motor çalışma sıcaklığına ulaştıktan sonra, B100, B50, B20, B5 ve petrol kökenli dizel yakıtı kullanılarak, 1000 d/d'den başlayarak 500 d/d aralıklar ile 3000 d/d'ye kadar, tam, 60, 40, 20 Nm sabit yükte ve aynı hız aralığında, motor performans, yanma, püskürtme ve emisyon karakterleri belirlenmiştir. Her bir testten sonra motor dinlenmeye alınmıştır. Motor test düzeneğinin veri toplama ünitesi yardımıyla aktarılan silindir ve yakıt hattı basıncı ile KA değerleri, motor kararlı rejime ulaştıktan sonra bilgisayara kaydedilmiştir. Kaydetme işleminde LabVIEW bilgisayar yazılımında yapılmış arayüz kullanılmıştır. Silindir basıncı ve yakıt hattı basınç verileri 0,25 krank açısına karşılık gelen örnekleme oranında bilgisayara aktarılmıştır. Daha sonra aktarılan verilerden 50 çevrimin ortalaması alınmıştır. Egzoz, yağ, yakıt, ortam, radyatör giriş ve çıkış sıcaklığı, ortam basıncı, bağıl nem, emisyon değerleri motor kararlı rejime ulaştıktan sonra el ile kayıt edilmiştir.



Deneylerde kullanılan yakıtların özellikleri Tablo 3.4’de verilmektedir. Deneylerde kullanılan karışımlar hacimsel olarak hazırlanmıştır. Şekil 4.4’de deneylerde kullanılan yakıtların ve ham madde olarak kullanılan yağın resmi gösterilmektedir.



Şekil 4.4: Deneylerde kullanılan yakıtlar ve ham madde olarak kullanılan yağ

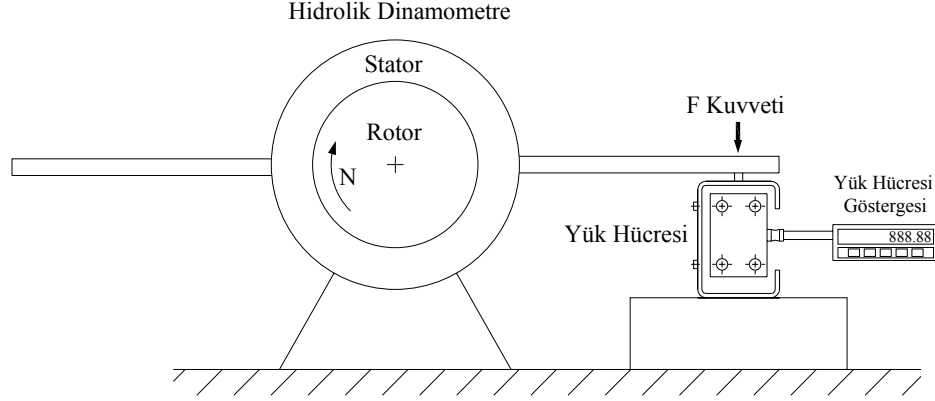
### 4.3. Deney Verileri ile Hesaplanan Performans Değerleri

Motor performansının incelenmek için döndürme momenti, efektif güç, özgül yakıt tüketimi, ortalama efektif basınç, volumetrik verim, termik verim, sıcaklık değişimleri, silindir basıncı, yakıt hattı basıncı ve ısı dağılım grafikleri oluşturulmuştur. Deneylerde el ile kaydedilen değerler, aşağıdaki tanımlanan formüller kullanılarak işlenmiştir.

#### 4.3.1. Döndürme momentinin ölçülmesi

Döndürme momenti bir motorun iş yapabilme yeteneğini göstermektedir. Döndürme momenti mekanik, hidrolik ve elektromanyetik dinamometreler yardımı ile ölçülebilmektedir. Hidrolik dinamometrelerde düşük sürtünmeli yatakla desteklenmiş rotor, hidrolik sürtünmeli olarak sabit olan statorla birleşiktir [2, 78]. Bu çalışmada, motor çıkış mili ile hidrolik dinamometrenin rotor flanşı arasına kardan mili monte edilerek, motorun dinamometre irtibatı sağlanmıştır. Şekil 4.5’de motor test

düzeninde döndürme momentinin ölçülmesinde kullanılan sistemin çalışma prensibi gösterilmektedir.



Şekil 4.5: Test düzeneğinde döndürme momentinin ölçülmesi

Motorun verdiği döndürme momenti ( $M_d$ ) önce rotora tesir etmekte, daha sonra rotor ile stator arasındaki bulunan sıvı aracılığıyla stator dönmeye çalışmaktadır. Stator üzerinde bulunan kol yük hücresine baskı yaparak, bir devirde  $2\pi r$  yolu boyunca kuvvet uygulamaktadır. Bu kuvvet motorun döndürme momenti olarak ifade edilmektedir. Statoru döndürmeye çalışan  $F$  kuvvetinin oluşturduğu moment;

$$M_d = F \cdot l \quad (4.1)$$

Buradaki ( $l$ ) uzunluğu,  $F$  kuvvetinin etkidiği nokta ile rotor merkezi arasındaki mesafeyi ifade etmektedir. Bu çalışmada, rotor merkezi ile yük hücresi arasında 0,34 m mesafe bulunmaktadır. Yük hücresinden okunan  $F$  kuvveti 3,33 ile çarpılmıştır.

#### 4.3.2. Efektif gücün hesaplanması

Motorun yanma odasında birim zamanda elde edilen iş indike güçtür. İndike gücün bir kısmı egzoz gazlarını dışarı atmak ve taze havayı emmek için kullanılmaktadır. Bir kısmı yataklar, piston segmanları gibi mekanik elemanların sürtünmelerini yenmek, diğer bir kısmı ise döner elemanlar için harcanmaktadır [79]. Aşağıdaki formülde verilen efektif güç bir motordan elde edilen yararlı gücün göstergesidir. Efektif güç ( $P_e$ ), döndürme momenti ve açısal hızın ürünüdür.

$$P_e = \omega.M_d \quad (4.2)$$

Motor devri ( $n$ ) dev/dak cinsinden olduğundan açısal hız,

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{\pi n}{30} \quad (1/sn) \quad (4.3)$$

Açısal hızı, denklem 4.2’de yerine koyup birimi kW cinsine dönüştürsek,

$$P_e = \frac{\pi n}{30} M_d \cdot 10^{-3}$$

$$P_e = \frac{n.M_d}{9549,58} \quad (\text{kW}) \quad \text{elde edilir.} \quad (4.4)$$

### 4.3.3. Ortalama efektif basıncının hesaplanması

Çevrim sırasında bir motorun silindiri içerisindeki basınç sürekli olarak değişmektedir. Bu yüzden bir ortalama basınç tanımının yapılması gerekmektedir. Ortalama efektif basınç, motorun gerçek çevrimindeki eşdeğer bir  $P_e$  gücünü vermesi için bir strok boyunca piston üzerine etkimesi gereken ortalama basınç değeri olarak tanımlanmaktadır [79]. Bir çevrimdeki iş  $W_e$  (Nm/çevrim), ortalama efektif basınç ( $p_{me}$ )-yer değiştirme hacmi ( $V_H$ ) ve moment-yol cinsinden hesaplanır eşitlenirse,

$$W_e = \frac{p_{me} \cdot V_H}{n_z} \quad (4.5)$$

$$W_e = 2\pi.M_d \quad (4.6)$$

Denklem 4.5 ve 4.6 eşitlenirse,

$$2\pi.M_d = p_{me} \cdot V_H / n_z$$

İki zamanlı motorlarda  $n_z = 1$ , dört zamanlı motorlarda  $n_z = 2$  (devir/çevrim) olmaktadır.

$$P_{me} = \frac{4\pi.M_d}{V_H} \text{ (N/m}^2\text{) elde edilir.} \quad (4.7)$$

Bu çalışmada kullanılacak motor için toplam yer değiştirme hacmi aşağıdaki formülle hesaplanmıştır.

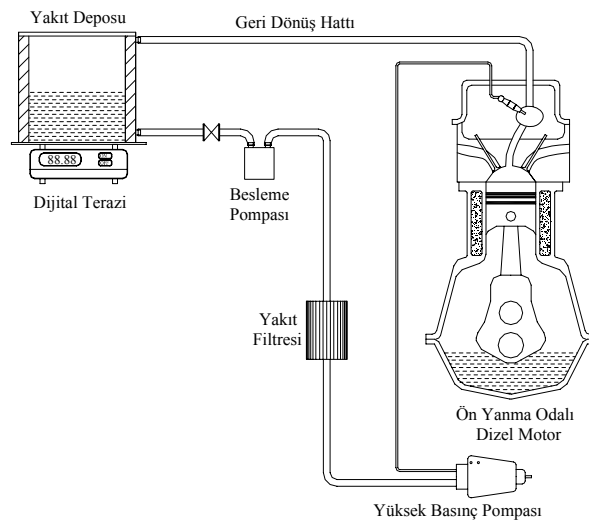
$$V_s = \frac{\pi D^2}{4} S.n_c = \frac{3,14 \times (0,08026)^2}{4} \times 0,0889.4 = 0,001798 \text{ m}^3$$

Burada,  $D$  silindir çapını,  $S$  pistonun kurs boyunu,  $n_c$  motorun silindir sayısını ifade etmektedir.

#### 4.3.4. Efektif özgül yakıt tüketiminin hesaplanması

Özgül yakıt tüketimi, birim güç başına, birim zamanda tüketilen yakıt miktarı olarak tarif edilmektedir [80]. Şekil 4.6'da test düzeneğinde yakıt tüketiminin ölçülmesinde kullanılan sistem gösterilmektedir. Deneylerde yakıt tüketimi gr/sn cinsinden ölçüldüğünden, gr/saat çevirmek için 3600 ile çarpılarak, birim gr/saat cinsine çevrilmiştir.

$$b_e = \frac{\dot{m}_y}{P_e} \times 3600 \quad (4.8)$$



Şekil 4.6: Test düzeneğinde yakıt tüketiminin ölçülmesi

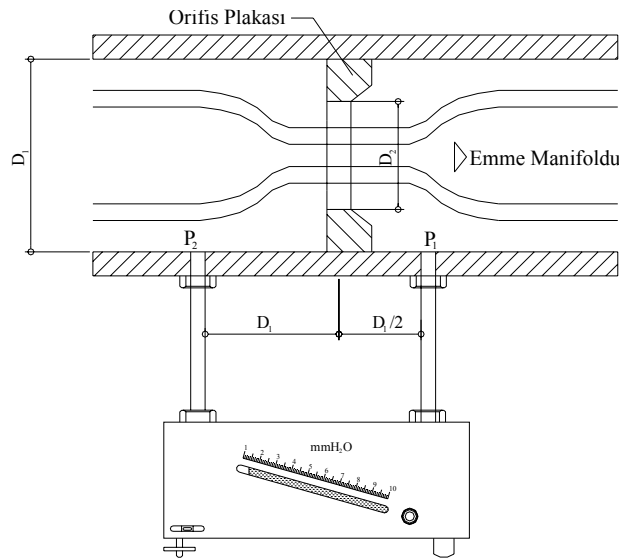
#### 4.3.5. Hava debisinin hesaplanması

Hava debisi, motor performansı ve emisyon karakterlerinin belirlenmesinde en önemli parametrelerdendir. Hava/Yakıt oranı, hava fazlalık katsayısı ve volümetrik verim gibi yanma olayının detayları, emisyon özellikleri ve müsaade edilebilir çalışma sınırları hakkında yeterli bilgi elde edebilmek için hava debisinin ölçülmesi gerekmektedir [2]. Motor deneylerinde, çapı belli olan bir boru içerisine, standarda uygun orifis plakası yerleştirilerek hava debisinin ölçülmesi en sık kullanılan yöntemdir [81]. Bu çalışmada, kütleli hava debisi ölçümünde ISO 5167 (1980) standardına uygun orifis plakası kullanılmıştır. Tablo 4.2’de orifis plakasının özellikleri verilmektedir.

Tablo 4.2: Orifis plakasının ISO 5167 (1980) standardına göre tanımı

Kullanılan alet	Boru çapı (mm)	Çap oranı ( $\beta$ )	Borunun Reynolds sayısı	Katsayı hassasiyeti (%)
Flanşlı-keskin köşeli tip orifis plakası	50–900	0,2–0,6	$10^4$ ile $10^7$	$\pm 0,6$

Standarda uygun olarak orifisten boru çapı kadar uzaklıktaki  $P_1$  basınç değeri ile orifisten boru çapının yarısı kadar uzaklıktaki  $P_2$  basınç değeri arasındaki fark, eğik manometre ile ölçülmüştür. Şekil 4.7’de bu çalışmada kullanılan kütleli hava debisi ölçüm şeması gösterilmektedir.



Şekil 4.7: Hava debisi ölçüm şeması

Eğik manometrede ölçülen basınç farkı,

$$\Delta P = P_1 - P_2 \quad (4.9)$$

Deney tesisatında eğik manometrede okunan basınç farkı mmH<sub>2</sub>O sütunu cinsinden olduğundan, N/m<sup>2</sup> (Pa) birimine çevirmek için 9,8066 ile çarpılmıştır. P<sub>1</sub> ve P<sub>2</sub> değerleri için Bernoulli ve süreklilik denklemleri kurulursa,

$$\dot{m}_{h,g} = \frac{C_E \cdot C_d \cdot A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{2\rho_{hava} \cdot \Delta P} \quad \text{eşitliği elde edilir.} \quad (4.10)$$

Burada;  $C_E$  genişleme katsayısı,  $C_d$  orifis (deşarj) katsayısı,  $A_1$  orifisin dış çap alanı (m<sup>2</sup>),  $A_2$  orifisin iç çap alanı (m<sup>2</sup>),  $\rho_{hava}$  (kg/m<sup>3</sup>) havanın yoğunluğudur. Denklem 4.10 çap oranına göre ifade edilirse,

$$\beta = \frac{D_2}{D_1} \quad (4.11)$$

$$\dot{m}_{h,g} = \frac{C_E \cdot C_d}{\sqrt{1 - \beta^4}} A_2 \sqrt{2\rho_{hava} \cdot \Delta P} \quad \text{elde edilir.} \quad (4.12)$$

Denklem 4.12'deki orifis katsayısı  $C_d$ , standarda verilen sonsuz reynolds sayısına göre türetilen aşağıdaki ampirik formül ile hesaplanmıştır.

$$C_d = 0,5959 + 0,0312\beta^{2,1} - 0,184\beta^8 + 2,286 \frac{\beta^4}{D(1 - \beta^4)} - 0,856 \frac{\beta^3}{D} \quad (4.13)$$

Denklem 4.12'deki havanın yoğunluğu ( $\rho_{hava}$ ), hava mükemmel gaz olduğu kabul edilerek,

$$\rho_{hava} = \frac{P_{atm}}{RT_{atm}} \quad \text{eşitliğinden bulunmuştur.} \quad (4.14)$$

Burada  $P_{atm}$ , mutlak atmosfer basıncını (kPa),  $R$ , havanın özgül gaz sabitini (kJ/kgK),  $T_{atm}$ , ortam sıcaklığını (K) ifade etmektedir. Standartta, ideal gaz ( $k = 1,4$ ) ve çap oranına göre tanımlanan eğrinin ortalaması alınırsa genişleme katsayısı 0,83 bulunur [82]. Sonuç olarak, bu çalışmada kütleli hava debisi,

$$\dot{m}_{h,g} = 0,83 \cdot 0,62 \cdot \frac{\pi \cdot D_2^2}{4} \sqrt{2 \cdot \rho_{hava} \Delta P} \text{ formülü kullanılarak hesap edilmiştir.} \quad (4.15)$$

#### 4.3.6. Hava/Yakıt oranının hesaplanması

Hava-yakıt oranı, pratikte silindire alınan kütleli hava miktarının aynı şartlardaki kütleli yakıt miktarına oranını ifade etmektedir. Yanma reaksiyonun gerçekleşmesi, silindir içerisinde uygun hava-yakıt oranının bulunmasına bağlıdır. Hava/Yakıt oranı karışım oranının tanımlanmasını sağlayan önemli bir parametredir [2, 78].

$$HY = \frac{\dot{m}_{h,g}}{\dot{m}_y} \quad (4.16)$$

#### 4.3.7. Volümetrik verim

Emme sistemindeki (hava filtresi, emme manifoldu, emme kanalı, emme supabı gibi) elemanların oluşturduğu direnç, pistonun yer değiştirme hareketi ile emilen hava miktarını sınırlandırmaktadır. Silindire daha fazla hava girişi daha fazla yakıtın yanabilmesi anlamına gelmekte ve daha fazla enerji dönüşümü elde edilerek motorun çıkış gücü artmaktadır. Volümetrik verim bir motorun emme prosesinin etkinliğini gösteren ve sadece 4 zamanlı motorlar için kullanılan bir parametredir. Volümetrik verim, motorun belli çalışma şartlarında emdiği gerçek hava miktarının aynı çalışma şartlarında kapasitesine göre emmesi gereken teorik hava miktarına oranıdır [2, 79]. Volümetrik verim aşağıdaki ampirik formülle hesaplanmaktadır;

$$\eta_V = \frac{2 \cdot \dot{m}_{h,g}}{\rho_{hava} \cdot V_S \cdot n} \quad (4.17)$$

#### 4.3.8. Termik verim

Termik verim motor milinden elde edilen net işin motora sürülen enerji miktarına oranıdır [83].

$$\eta_t = \frac{W_e}{Q_g} \quad (4.18)$$

Burada  $Q_g$  (kJ), yakıt ile motora sürülen enerji miktarıdır. Denklem 4.18 birim zaman için yazılırsa,

$$\eta_t = \frac{P_e}{\dot{Q}_g} = \frac{P_e}{\dot{m}_y \cdot H_U} \quad \text{elde edilir.} \quad (4.19)$$

Burada  $H_U$  (kJ/kg), yakıtın alt ısıl değeridir. Denklem 4.8, denklem 4.19'de yerine konur birim dönüşümü yapılırsa,

$$\eta_t = \frac{3,6 \times 10^6}{b_e \cdot H_U} \quad \text{sonucuna ulaşılır.} \quad (4.20)$$

#### 4.3.9. Sıcaklıkların ölçülmesi

İçten yanmalı motorlarda, motora yakıt ile verilen ısı enerjisi mekanik enerjiye dönüşürken, bir takım enerji kayıpları meydana gelmektedir. Bu kayıplar; egzoz gazları, soğutma suyu, sürtünme ve radyasyon yoluyla olmaktadır. Motorlarda maksimum çevrim sıcaklığı motorun yapısal özellikleri nedeniyle sınırlandırılmıştır. Bu nedenle, motor parça sıcaklıklarının kontrol edilebilmesi için soğutma sistemine ihtiyaç vardır. Dört zamanlı bir dizel motorunda soğutma yoluyla oluşan ısı kaybı %20–28 arasında değişmektedir. Bu ısı kaybı soğutma suyunda ve yağlama yağında meydana gelmektedir. Yalnızca yağlama yağında ortalama %8'lik bir kayıp söz konusudur [78, 84]. Bu çalışmada, sıcaklık farklarını tespit edebilmek için radyatör giriş ve çıkış, egzoz gaz, motor yağ ve yakıt sıcaklıkları ölçülmüştür.



#### 4.3.10. Silindir ve yakıt hattı basınçlarının hesaplanması

Dizel motorlarda emme zamanında hava herhangi bir kısıtlamaya maruz kalmadığı için piston alt ölü noktaya (AÖN) ulaştığı anda silindir içi basıncın atmosfer basıncına eşit olduğu kabul edilmektedir [31]. Bu yüzden, sıkıştırmanın başlaması ile ölçülen basınç değerine atmosfer basıncı eklenmiştir. Herhangi bir KA'da çıkış voltajından yararlanılarak mutlak basıncın hesaplanması aşağıdaki formülle yapılmıştır,

$$P_{\theta} = C_0 x (E_{\theta} - E_{AÖN}) + P_{AÖN} \quad (4.21)$$

Burada  $E_{AÖN}$ , piston AÖN'da iken sinyal şartlandırıcı çıkışındaki voltaj değeridir.

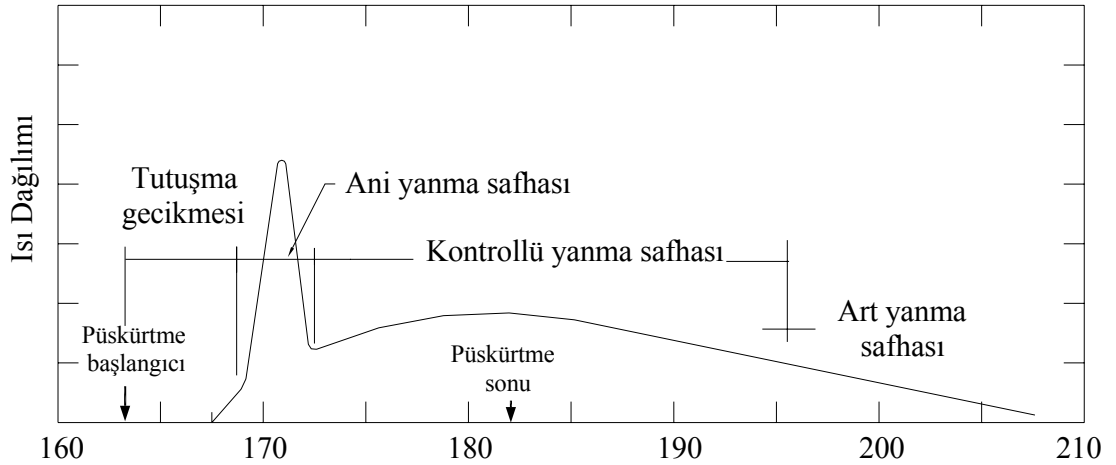
$E_{\theta}$ , herhangi bir KA'daki voltaj değerini,  $P_{AÖN}$  ise piston AÖN'daki basınç değerini ifade etmektedir. Sinyal şartlandırıcısının, maksimum ve minimum çıkış voltajı üretici firma tarafından +/-10V olarak belirlenmiştir. Basınç algılayıcısı 0–250 bar ölçüm aralığına sahip olduğundan, voltaj değeri ile doğru orantılı olarak 25 bar için 1 V'luk çıkış gerilim üretmektedir.  $C_0$  ise sinyal şartlandırıcısının çıkış voltajı ile basınç arasındaki oranı belirleyen bir katsayıdır.  $C_0$  katsayısı 25 olarak hesaplanmıştır.

#### 4.4. Performans Verilerinin Analizi

Bu çalışmada, petrol kökenli dizel yakıtının, biyodizelin ve karışımların motor performansı (yanma) üzerine etkisini analiz etmek için ön yanma odalı dizel motor tam yükte-değişik devir, sabit yükte-değişik devir testlerine tabi tutularak silindir ve yakıt hattı basınçları elde edilmiştir. Deneyle elde edilen veriler kullanılarak silindir basıncı, yakıt hattı basıncı ve ısı dağılımı grafikleri KA'ya göre oluşturulmuştur. Aynı şartlar için döndürme momenti, güç, özgül yakıt tüketimi, ortalama efektif basınç, volümetrik verim, termik verim ile ilişkilendirilerek yorumlanmıştır.

#### 4.4.1. Dizel motorlarda yanma

Dizel motorlar, yanma odası tasarımları temel alınarak iki kategoriye ayrılır; direkt püskürtmeli ve ön yanma odalı dizel motorlar. Ön yanma odalı dizel motorlar yakıtın kararlı ve kademeli olarak yanmasını sağlamak için geliştirilmiştir. Sıkıştırma sırasında zorlanan hava dar bir kanaldan geçerek silindir kapağına sabitlenmiş bir ön yanma odacığına gelmektedir. Yakıtın püskürtülmesi ile ön odacıkta önce kısmi bir yanma meydana gelmekte, daha sonra kısmen yanmış yakıt yüksek bir hızla yine dar kanaldan ana yanma odasına geçmektedir. Bu motorlarda, ön yanma odasından yüksek hızla gelen okside olmuş yakıtın ve silindir içerisindeki güçlü hava burgacının etkisinden dolayı yanma hızı artmaktadır [2, 85]. Dizel motorlarda yanma, yakıtın püskürtüldüğü andan başlayarak egzoz supabının açıldığı ana kadar ki mesafe temel alınarak incelenmektedir. Bu mesafe 4 ana safhaya ayrılmaktadır. Şekil 4.8'de ısı dağılımı-krank açısı grafiği üzerinden dizel motorlarında yanma safhaları gösterilmektedir.



Şekil 4.8: Dizel motorlarda yanma safhaları [2]

Grafikte birinci safha tutuşma gecikmesi safhasıdır. Dizel motorlarında tutuşma gecikmesi püskürtme başlangıcı ile yanma başlangıcı arasındaki zamana (veya krank açısına) tutuşma gecikmesi denilmektedir. Tutuşma gecikmesi genellikle iki farklı ardışık safhadan oluşmaktadır. Bu safhalar fiziksel ve kimyasal tutuşma gecikmesidir. Tutuşma gecikmesi süresince yakıt püskürtülmekte ve

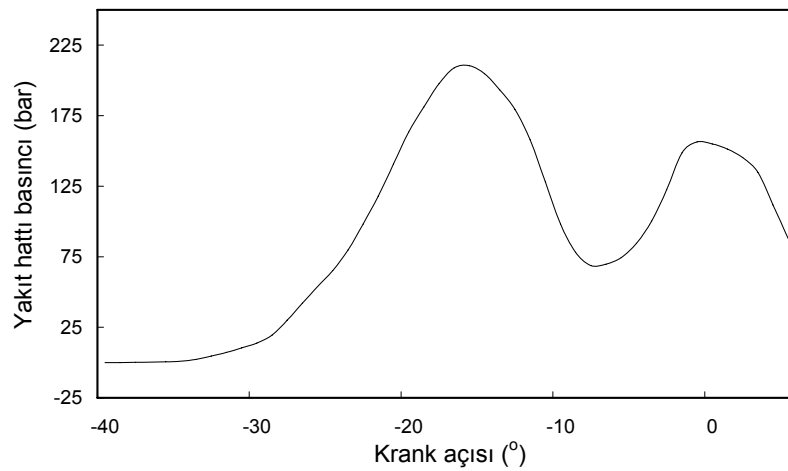
buharlaşmaktadır. Sıvı yakıt silindire püskürtüldükten sonra küçük damlacıklara ayrılmakta, damlacıklar çevresindeki hava ile reaksiyona girerek ve karışım buharı oluşturmaktadır. Genel kabul bu safhanın fiziksel tutuşma gecikmesi olduğudur. Fiziksel tutuşma gecikmesi ortam şartlarına bağlı olduğundan dolayı kontrol edilememektedir. Tutuşma gecikmesini etkileyen en önemli parametre yakıt buharı ile hava (oksijen) karışımının kimyasal denge hızıdır. Püskürtme basıncı, enjektör memesindeki deliklerin çapı ve delik sayısı tutuşma gecikmesini etkileyen diğer faktörlerdir. Pratik uygulamalarda dizel motorların yakıt enjektörleri, küçük bir hava yakıt buharını çok çabuk oluşturabilecek şekilde tasarlanmaktadır. Fiziksel tutuşma gecikmesi ön yanma odalı dizel motorlarda direkt püskürtmeli motorlara nazaran çok daha önemli bir etkiye sahiptir [85, 86]. İkinci safha ani yanma safhasıdır. Bu safhada hava yakıt karışımı büyük bir hızla yanmakta ve birkaç krank açısı derecesinde ani basınç artışı olmaktadır. Çevrimden maksimum basıncın elde edilmesi bu safhaya bağlıdır. Üçüncü safha kontrollü yanma safhasıdır. Bu safha maksimum basınçla yanmanın büyük ölçüde tamamlandığı an arasındaki bir süreyi kapsamaktadır. Ani yanma süresi sonunda sıcaklık ve basınç çok yüksek olduğundan bu safhadan sonra püskürtülen yakıt oksijen bulunca hemen yanar. Dördüncü safha art yanma safhasıdır. Bu safha genişleme zamanında ısı dağılımının hala devam ettiği alanı içermektedir [2]. Yakıtça zengin karışimli yanmada ısı dağılımı biraz daha yüksektir.

#### **4.4.2. Silindir basınç verilerinin ve tutuşma gecikmesinin analizi**

Genelde enjektör memesinin oturma yüzeyinden ayrıldığı an püskürtme başlangıcı olarak alınmakta, fakat yanma başlangıcını tam olarak belirlemede zorlanılmaktadır. Direkt püskürtmeli veya ön yanma odalı dizel motorlarda silindir basınç verilerine veya ısı dağılımı eğrisindeki değişime bakılarak tutuşma başlangıcını tespit etmek, en çok kullanılan yöntemdir [86]. Yakıtın oksitlenmesi ile veya alev yayılımının başlaması ile ısı dağılım eğrisi oluşmaya başlamaktadır. Direkt püskürtmeli veya ön yanma odalı dizel motorlarda ısı dağılım eğrisindeki yükselmenin başladığı ilk nokta yanma başlangıcı olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmada, yakıt hattı basınç eğrisi kullanılarak püskürtme başlangıç noktası, ısı dağılımı eğrisi kullanılarak yanma

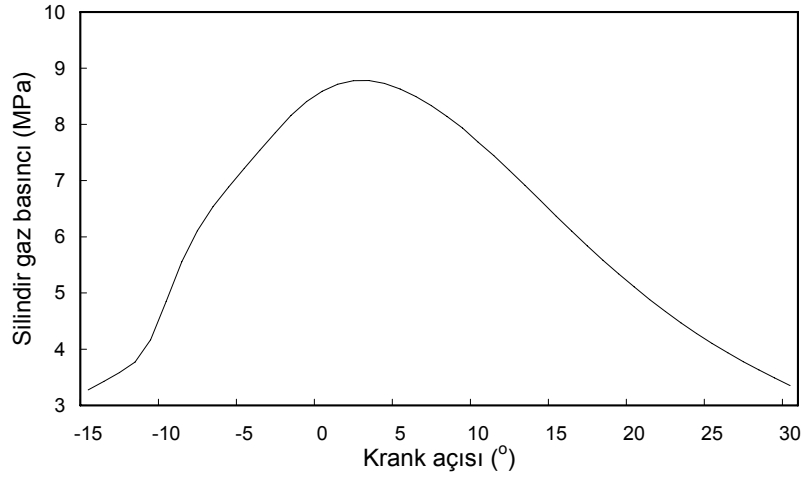
başlangıç noktası tespit edilmiştir. İki nokta arasındaki mesafe krank açısı cinsinden tutuşma gecikme süresi olarak alınmıştır.

Ön yanma odalı dizel motorlarda, normal şartlar altında yapılan bazı deneysel çalışmalarda alevin ilk görüldüğü noktadan sonra basınç yükselmesinin olduğu görülmüştür. Bu yüzden ön yanma odalı dizel motorlarda tutuşma gecikmesi belirlemede hata ve belirsizlik direkt püskürtmeli dizel motorlara göre biraz daha fazla olmaktadır [2]. Bazı çalışmalarda ön yanma odalı dizel motorlarda tutuşma noktasını belirlemek için alev parlaklık algılayıcısı kullanılmıştır [87]. Ayrıca yakıt özellikleri kullanılarak da tutuşma gecikmesi hesabı yapılabilmektedir. Genellikle direkt püskürtmeli dizel motorlar ile yapılan çalışmalarda Aligrot ve arkadaşları [88] tarafından önerilen yakıtın setan sayısı, kinematik viskozitesi, parafin içeriği gibi yakıt özelliklerine bağlı tutuşma gecikmesi hesabı kullanılmaktadır. Fakat, Astarita ve arkadaşları [89] tarafından ön yanma odalı motorda yapılan deneyde, yakıtın kaynama noktasının tutuşma gecikmesi üzerine herhangi bir etkisi olmadığını gözlemlemişlerdir. Bu yüzden ön yanma odalı dizel motorlarda yakıt özelliklerine bağlı tutuşma gecikmesi hesaplamalarında hata ve belirsizlikler artmaktadır. Şekil 4.9'da örnek bir yakıt hattı basınç grafiği gösterilmektedir. Grafik kuvars-kristalli algılayıcıdan gelen 50 çevrime ait verilerin ortalaması alınarak oluşturulmuştur. Deneylerde kullanılan enjektörün açılma basıncı 130 bardır. Tüm yakıt hattı basıncı grafiklerinde 130 bar referans nokta olarak alınmıştır.



Şekil 4.9: Yakıt hattı basınç grafiği

Şekil 4.10’da örnek bir silindir basınç grafiği gösterilmektedir. Grafik piezo-kristalli algılayıcıdan gelen 50 çevrime ait verilerin ortalaması alınarak oluşturulmuştur. Basınç algılayıcısı mutlak basınç cinsinden ölçüm yapmadığından, ölçülen basınç değeri mutlak basınca çevrilmiştir.



Şekil 4.10: Silindir basınç grafiği

#### 4.4.3. Isı dağılımının analizi ve filtreleme

Bir çevrim sırasında, sıkıştırma ve genişleme zamanında her bir KA’ya karşı gelen silindir basıncı yanma işleminin niceliğine ait bilgiler vermektedir. Bu bilgiler, yakıtın kimyasal enerjisinin ısı enerjisine dönüşmesi sonucu açığa çıkan enerjidir. Bu enerji dönüşümüne termodinamiğin birinci kanunu uygulanarak ısı dağılımı grafiği oluşturulmaktadır. Deneysel ölçüm sırasında silindir basınç algılayıcısından gelen veriler, silindir hacminin anlık değişimi, yanma, silindir duvarına ısı transferi, çatlak (segman kanalları gibi) ve sızıntı bölgelerine enerji akışı gibi faktörler etkilenecek şekilde sürekli bir değişim göstermektedir. Bunlar arasında, silindir hacminin değişimi ve yanma, grafik üzerine etki eden en önemli faktörlerdir. Basınç verileri kullanılarak genelde iki metot üzerinden yanma bilgisi değerlendirilmektedir. Bunlardan birincisi; yanma süresince basınç dalgalanmaları, bölgesel sıcaklık değişimleri gibi etkenler ihmal edilir, silindir içerisindeki sıcaklığın düzenli olduğu kabul edilerek ısı dağılımı hesaplanmaktadır [2, 31, 90]. İkincisi ise; püskürtülen yakıtın kimyasal enerjisine ve yanma sonu ürünlerine bağlı olarak silindir içerisindeki ısı dağılımı

hesaplanmaktadır [91]. Bu çalışmada, birinci metot kullanılarak bir çevrim için ısı dağılımı hesaplanmıştır.

Ön yanma odalı dizel motorlarda ön ve ana yanma odalarında, basınç ve sıcaklık yanma süresince farklılık göstermektedir. Yanmanın başlangıç anında ön yanma odasında basınç yükselmesi ana yanma odasındakine göre daha yüksektir. Bu basınç (yaklaşık 0,5–5 atm) farkı yanmanın ana yanma odasına doğru gelişimini sağlamaktadır [2, 92]. Bu çalışmada, ön yanma odalı ile ana yanma odası tek bir sistem olarak ele alınmıştır. Li ve diğ. [93] tarafından ön yanma odalı dizel motorlar için önerilen tek bölgeci yanma modeli uygulanmıştır. Bu hesaplamalar sırasında aşağıdaki kabuller esas alınmıştır.

- Isı çıkış işlemi silindir hacmindeki ortalama değerlere göre tanımlanmıştır, bölgesel yanma karakteristiklerine bakılmamıştır,
- Ön yanma odasındaki basınç ve sıcaklık dağılımı ihmal edilmiştir
- Yakıt buharı ve yanma ürünlerinin karışımı ideal gaz olarak kabul edilmiştir,
- Silindirdeki sızıntılar ihmal edilmiştir,
- Silindir içerisindeki karışımların her an termik ve kimyasal dengede olduğu kabul edilmektedir.

Emme ve egzoz supaplarının kapalı olduğu, kapalı bir sistem için Termodinamiğin I. kanunu yazılırsa;

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{dU}{dt} \quad (4.22)$$

Burada;  $\dot{Q}$ , Sistemin sınırlarına karşı yapılan ısı transfer oranını veya silindir duvarlarına giden enerjiyi,  $\dot{W}$ , sistem sınırlarının yer değiştirmesi oluşan sınır işini ifade etmektedir. Denklem 4.22’de birim zamanda iç enerji ve sınır işi değişimi yerine, denklem 4.23 ve 4.24 konulursa, denklem 4.25 elde edilir.

$$\frac{dU}{dt} = mc_v \frac{dT}{dt} \quad (4.23)$$

$$\dot{W} = P \frac{dV}{dt} \quad (4.24)$$

$$\dot{Q} = mc_v \frac{dT}{dt} + P \frac{dV}{dt} \quad (4.25)$$

İdeal gaz denklemindeki kütleinin sabit olduğu kabul edilip zamana göre türevi alınır, denklem 4.27 elde edilir.

$$PV = mRT \Rightarrow T = \frac{PV}{mR} \quad (4.26)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{mR} \left[ P \frac{dV}{dt} + V \frac{dP}{dt} \right] \quad (4.27)$$

Denklem 4.27'de elde edilen eşitlik 4.25'de yerine konursa, denklem 4.28 elde edilir.

$$\dot{Q} = \left[ \frac{c_v}{R} + 1 \right] P \frac{dV}{dt} + \frac{c_v}{R} V \frac{dP}{dt} \quad (4.28)$$

$\frac{c_v}{R}$ ,  $k$  özgül ısı oranı cinsinde ifade edilirse

$$\frac{c_v}{R} = \frac{1}{k-1} \quad \text{şeklinde yazılır.} \quad (4.29)$$

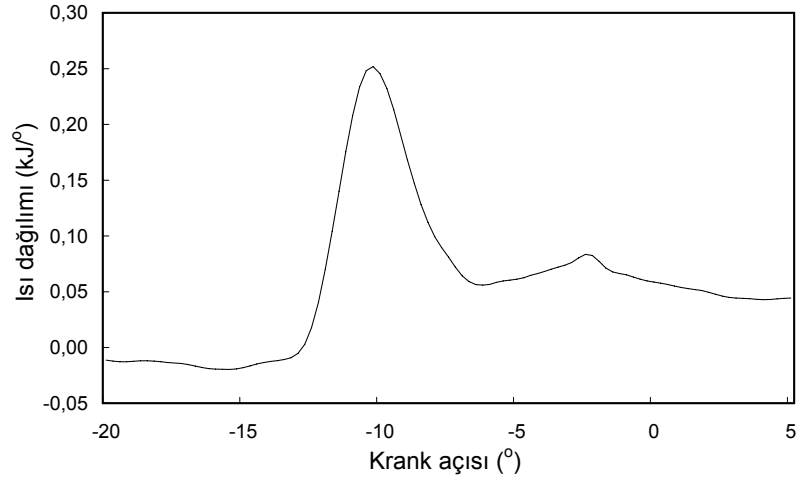
Denklem 4.29'deki eşitlik denklem 4.28'de yerine yazılır ve zamana göre değişim ( $dt$ ),  $KA$  cinsinden ( $d\theta$ ) ifade edilirse,

$$\dot{Q} = \frac{k}{k-1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{k-1} V \frac{dP}{d\theta} \quad \text{sonucuna ulaşılır.} \quad (4.30)$$

Formül 4.30'da da görüldüğü gibi ısı dağılımı eğrisinin oluşturulabilmesi için basınç ve hacmin krank açısına göre türevinin alınması gerekmektedir. Silindir basıncı ölçümünde bir derecelik hatası ısı dağılımında %50'lere varan hataya neden olmaktadır. Bu hatayı giderebilmek için Monyem [94] ve Canakci [31] doktora tez çalışmasında denklem 4.31'i kullanmış ve olumlu sonuçlar elde etmişlerdir. Bu denklemde, tespit edilecek merkez noktadaki basınç, merkez noktadan iki ileri ve iki geri olmak üzere dört noktanın değerleri kullanılarak hesaplanmaktadır [31].

$$(du/dx)_i = (-u_{i+2} + 8u_{i+1} - 8u_{i-1} + u_{i-2}) / (12x\Delta\theta) \quad (4.31)$$

Bu çalışmada, denklem 4.30 ile edilen ısı dağılımına, denklem 4.31 uygulandıktan sonra ısı dağılımı eğrisi çizilmiştir. Şekil 4.11’de filtreli örnek bir ısı dağılımı grafiği gösterilmektedir.

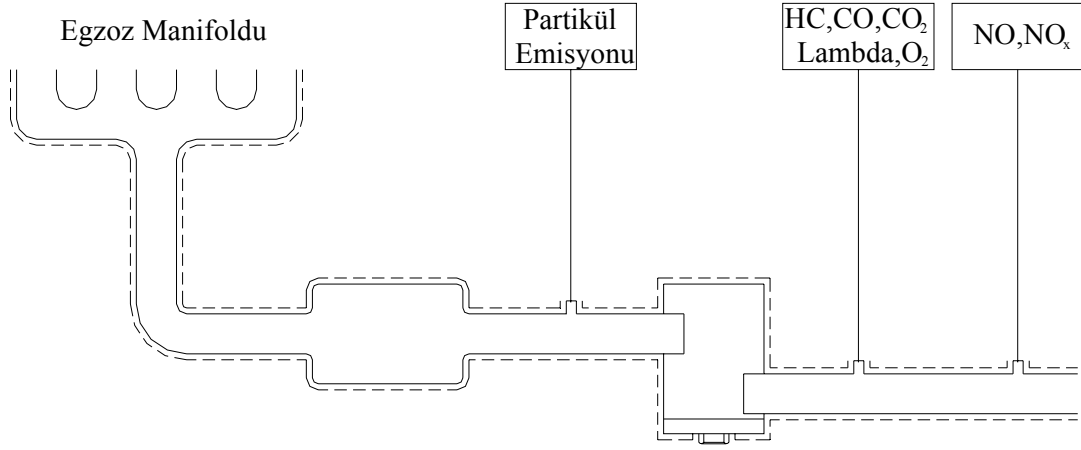


Şekil 4.11: Isı dağılımı grafiği

#### 4.5. Egzoz Emisyon Verilerinin Analizi

Bir dizel motorda kullanılan bir hidrokarbon, havada bulunan oksijen ile tam ve kısmen reaksiyona girmesi sonucunda, yanmamış HC, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> ve partiküller oluşmaktadır [2, 95]. Bunlar içerisinde, CO, NO<sub>x</sub>, karbon parçacıkları, yanmamış HC, egzoz emisyon düzenlemelerinin temelini oluştururlar. Bu çalışmada, biyodizel ve karışımlarının emisyon karakterleri üzerine etkisi incelemek için biyodizel ve karışımlarının CO, CO<sub>2</sub>, yanmamış HC, NO<sub>x</sub> emisyonu ve duman koyuluğu PKDY referans alınarak karşılaştırılacaktır. Şekil 4.11’de test motorunun egzoz sistemindeki emisyon ölçüm noktaları görülmektedir.





Şekil 4.12: Test motorunun egzoz sistemindeki emisyon ölçüm noktaları

#### 4.5.1 Egzoz emisyon standartları

Motorun soğukta ilk hareketi, ivmelenmesinin artması veya azalması gibi durumlarda egzoz gazları içerisindeki CO, HC, PM ve NO<sub>x</sub> miktarları değişim göstermektedir. Motorun çeşitli çalışma koşullarındaki değişimlerin, kirletici emisyonlar üzerine etkisinin azaltılması çevre ve insan sağlığı açısından önem taşımaktadır. Dizel motorları benzinli motorlar ile egzoz emisyonları açısından karşılaştırıldığında NO<sub>x</sub> ve PM emisyonları daha fazladır. Dizel motorlarındaki yanma sürecinde sıcaklığın yüksek olması ve ortamda aşırı oksijen bulunmasının sonucu olarak NO<sub>x</sub> emisyonları benzinli motorlara nazaran çok daha yüksek çıkmaktadır. Modern dizel motorlarında partikül emisyonları kütsel olarak çok azdır, fakat partikül sayısı çok fazladır. Partikül sayısı partikül kütselinden daha çok önemsenmektedir [6, 96]. AB ve EPA (U.S. Environmental Protection Agency) NO<sub>x</sub> ve PM emisyonlarında önemli azalmalar sağlamak amacıyla emisyon standartları önermiştir. Tablo 4.3’de AB komisyonu tarafından uygulanan ve önerilen hafif ticari dizel araçlar için egzoz emisyon standartları verilmiştir. Önerilen bu standartların bir sonucu olarak partikül ve NO<sub>x</sub> emisyonlarında önemli azalmalar sağlanmıştır. Ayrıca önerilen emisyonlar teknolojide yeniliklere ve alternatif yakıt çalışmalarına bağlı olduğundan belli bir takvim izlenmesi gerekmektedir. 2000–2005 standartları uyulması zorunlu olan yakıt kalitesi kuralları getirmektedir. Örneğin; 2000 yılı itibariyle maksimumum dizel yakıtının içeriğindeki sülfür maksimum 350 ppm iken

2005 yılı itibariyle maksimum 50 ppm, 2000 yılı itibariyle benzinini içeriğindeki sülfür maksimum 150 ppm iken 2005 yılında maksimum 50 ppm olma zorunluluğu getirilmiştir [97, 98].

Tablo 4.3: Hafif ticari dizel araçlar için egzoz emisyon standartları [98]

Sınıf	Standard	Tarih	CO	HC+NO <sub>x</sub> (g/km)	NO <sub>x</sub> (g/km)	PM (g/km)
Sınıf I <1305 kg	Euro 1	10.1994	2,72	0,97	-	0,14
	Euro 2, IDI	01.1998	1,0	0,70	-	0,08
	Euro 2, DI	01 <sup>a</sup> .1998	1,0	0,90	-	0,10
	Euro 3	01.2000	0,64	0,56	0,50	0,05
	Euro 4	01.2005	0,50	0,30	0,25	0,025
Sınıf II 1305–1760 kg	Euro 1	10.1994	5,17	1,40	-	0,19
	Euro 2, IDI	01.1998	1,25	1,0	-	0,12
	Euro 2, DI	01 <sup>a</sup> .1998	1,25	1,30	-	0,14
	Euro 3	01.2001	0,80	0,72	0,65	0,07
	Euro 4	01.2006	0,63	0,39	0,33	0,04
Sınıf III >1760 kg	Euro 1	10.1994	6,90	1,70	-	0,25
	Euro 2, IDI	01.1998	1,5	1,20	-	0,17
	Euro 2, DI	01 <sup>a</sup> .1998	1,5	1,60	-	0,20
	Euro 3	01.2001	0,95	0,86	0,78	0,10
	Euro 4	01.2006	0,74	0,46	0,39	0,06
Euro 1 ve 2 için taşıt ağırlık sınıflandırması; Sınıf I < 1250 kg, Sınıf II 1250–1700 kg, Sınıf III > 1700 kg.						
a - 1999.09.30 tarihine kadar geçerli (bu tarihten sonra DI ve IDI motorların emisyon değerleri aynı)						

2003 yılında Almanya Çevre Bürosu (UBA) tarafından içten yanmalı motorlar için yeni emisyon (Euro5 ve Euro6) standartları yayımlandı. Tablo 4.4’de UBA tarafından binek ve hafif ticari dizel araçlar için önerilen Euro5 emisyon standartları verilmektedir. Önerilen Euro5 ve Euro6 çevre kirliliğini önlemede etkili olduğu kadar teknolojik uygulanabilirliğe de sahip olmalıdır. Birçok sivil örgütler UBA’nın yayınladığı yeni emisyon standartlarını desteklemektedir [99].

Binek araçlar ve hafifi ticari araçlar için Euro5 Standartlarındaki temel noktalar;

- Limit değerler yakıttan bağımsız olmalı
- Partikül kütlesi limit değeri, partikül tutucusuna göre tanımlanmalıdır.

- Eğer partikül filtresi veya bu teknolojiyle ilgili başka bir yenilik PM emisyon oranında önemli bir azalma sağlıyorsa, bu teknolojiye göre partikül limitleri belirlenmeli.
- Dizel araçlar için NO<sub>x</sub> limit değerleri Euro 4’de verilen değeri karşılamalıdır. Dizel araçlar için toplam HC + NO<sub>x</sub> seviyesi ihmal edilebilir.
- HC limit değeri hem benzinli hem de dizel araçlar için 0,05 g/km dır.

Tablo 4.4: UBA tarafından binek ve hafif ticari dizel araçlar için önerilen Euro5 emisyon standartları (Bu değerle 2005–2010 tarihleri arasında geçerlidir) [99]

Tarih	Taşıt Sınıfı/Grubu		Referans Ağırlık RA (kg)	CO (g/km)		HC (g/km)		NO <sub>x</sub> (g/km)		Partikül Kütlesi (g/km)
	Sınıf	Grup		Petrol	Dizel	Petrol	Dizel	Petrol	Dizel	
01.01.2010	Binek Araçlar	-	Hepsi	1,0	0,05	0,08	0,08	0,0025		
01.01.2010	Hafif Ticari Araçlar	I	RA≤1305	1,0	0,08	0,08	0,0025			
		II	1305<RA≤1760	1,0	-	-	0,0025			
		III	1760<RA	1,25	-	0,10	0,0032			

#### 4.5.2. CO emisyonları

Yanma ürünleri arasında CO bulunmasının ana nedeni oksijenin yetersiz olmasıdır. Yanma odasının tümü ele alındığında, oksijen genel olarak yetersiz olabileceği gibi, karışımın tam homojen olmaması durumunda yanma odasında yerel olarak da oksijen yetersizliği olabilir. Bir motorda CO emisyonu, ilk çalışma veya hızlanma gibi hava-yakıt karışımının yakıtça zengin olduğu durumda maksimum seviyeye ulaşmaktadır. Temel olarak CO oluşumu hava fazlalık katsayısının kuvvetli bir fonksiyonu olarak değişmektedir. CO emisyonu motorda kullanılmayan kayıp kimyasal enerjiyi ifade ettiği için önemli bir parametredir. Aynı zamanda CO bir yakıttır, oksijenle reaksiyona girerek CO<sub>2</sub> oluşturur [2, 100]. Denklem 4.32’de reaksiyon ifade edilmiştir.



### 4.5.3. NO<sub>x</sub> emisyonları

Yanma sonucu ulaşılan yüksek sıcaklıklarda, havanın içerisindeki azotun oksijen ile birleşmesi sonucu azot oksitler meydana gelmektedir. NO<sub>x</sub>'in içerisinde ana eleman olarak genellikle NO ve N<sub>2</sub> bulunmaktadır. Egzoz gazlarının daha sonra atmosfere atılması sonucu oksijen ile temas eden NO'nun bir kısmı NO<sub>2</sub> ve diğer NO<sub>x</sub>'lere dönüşmektedir. NO<sub>x</sub> oluşumunu etkileyen iki temel parametre yanma odası sıcaklığı (2500–3000K) ve Yakıt/Hava ( $\Phi=0,95$ ) oranıdır. Aynı zamanda nitrojen yakıtın içerisinde nitrojen (NH<sub>3</sub>, NC ve HCN) bulunabilir. Fakat bu bileşikler NO<sub>x</sub> oluşumunda çok küçük bir etkiye sahiptir. Yanma odasında NO<sub>x</sub> oluşumunun, ön alev bölgesinde nitrojen moleküllerinin oksidasyonu, alev bölgesinde NO oluşumu ve yakıtın içerisindeki nitrojen bağları içeren bileşiklerin oksidasyonu olmak üzere üç nedeni vardır. Genellikle ön yanma odalı ve direkt püskürtmeli dizel motorlar yüksek sıkıştırma oranına sahip olduklarından, daha yüksek sıcaklık ve basınç üretirler. Bu yüzden dizel motorlar buji ateşlemeli motorlara göre NO<sub>x</sub> oluşum seviyesi daha yüksektir [2, 86, 100].



NO<sub>x</sub> emisyonu havadaki nemden önemli derecede etkilenmektedir. Yakıtların karşılaştırılabilmesi için gerçek NO<sub>x</sub> değerinin bulunması gerekmektedir. Gerçek NO<sub>x</sub> değerine nem düzeltme faktörü ile çarpılarak ulaşılmaktadır. SAE (The Society of Automotive Engineers) [101] tarafından önerilen denklemler kullanılarak gerçek NO<sub>x</sub> değerleri hesaplanmıştır. Hesaplama aşağıdaki yol izlenmiştir.

Havanın özgül nemi denklem 4.34 ile hesaplanmaktadır.

$$h = \frac{621,10 * P_v}{P_{atm} - P_v} \quad (4.34)$$

Burada;

$h$  = özgül nem (g H<sub>2</sub>O / kg kuru hava)

$P_v$  = su buharının kısmi basıncı (kPa)

$P_{atm}$  = atmosfer basıncı (kPa)

Su buharının kısmi basıncı bulmak için denklem 4.35’de verilen Ferrel’in formülü kullanılmıştır.

$$P_v = P_w - 1,8A * P_{atm} (T_{atm} - T_w) \quad (4.35)$$

Burada;

$P_w$  = yaş termometre sıcaklığındaki su buharının doyma basıncı (kPa)

$T_w$  = yaş termometre sıcaklığı (°C)

$T_{atm}$  = ortam sıcaklığı (°C)

$A$  = deneysel olarak elde edilmiş sabit bir sayısı

$$A = 3,67 * 10^{-4} (1 + 0,001152 * T_w) \quad (4.36)$$

formülü ile bulunmuştur. Yaş termometre sıcaklığındaki su buharının doyma basıncı Kenan ve Keye’nin buhar denkleminde elde edilmiştir.

$$P_w = 0,6048346 + 4,59058 * 10^{-2} T_w + 1,2444 * 10^{-3} T_w^2 + 3,52248 * 10^{-5} T_w^3 + 9,32206 * 10^{-8} T_w^4 + 4,18128 * 10^{-9} T_w^5 \quad (4.37)$$

Bu değerler elde edildikten sonra  $NO_x$  düzeltme faktörü hesaplanmıştır.

$$[NO]_{düz} = [NO]_{yaş} * \frac{1}{k} \quad (4.38)$$

Burada;  $[NO]_{düz}$  = düzeltilmiş NO konsantrasyonu (ppm)

$[NO]_{yaş}$  = ölçülen NO konsantrasyonu (ppm)

$$k = 1 + 7A(h - 10,714) + 1,8B(T_{emme} - 29,444) \quad (4.39)$$

$$A = 0,044(Y/H) - 0,0038 \quad (4.40)$$

$$B = -0,166(Y/H) + 0,0053 \quad (4.41)$$

$T_{emme}$  = emme havasının (°C) sıcaklığıdır.

#### 4.5.4. Yanmamış HC emisyonları

Yanma ürünleri arasında HC'ların bulunmasının nedeni, yakıtın tutuşma sıcaklığının oluşmaması veya ortamda oksijenin yetersiz olmasıdır. CO ve NO<sub>x</sub>'lerin oluşmasına neden olan yüksek sıcaklık, egzoz gazlarındaki HC emisyonunu etkilememektedir. Motorda yanma olayının fotoğrafları çekildiğinde, silindir cidarlarına yakın bölgelerde yanmanın hiç gerçekleşmediği görülmüştür. HC emisyonunun ana kaynağı, alev sönme bölgesi olarak adlandırılan bu kısımlarda bulunan HC'ların yanmadan egzoz kanalına girmesidir. HC emisyonu atmosfere girdiği zaman kötü kokulu ve tahriş edici bir etkiye sahiptir. Bazı HC'lar kansere yol açmaktadır. CH<sub>4</sub> hariç tüm HC bileşikleri atmosferde gazlarla reaksiyona girerek fotokimyasal sis oluşturmaktadır. HC emisyonları açısından, DP dizel motorlar ile EDP dizel motorlar arasında önemli farklılıklar bulunmaktadır. Özellikle düşük yüklerde DP dizel motorları, EDP dizel motorlarına nazaran çok daha yüksek oranda HC emisyonu üretmektedir. Son zamanlarda geliştirilen yüksek devirli DP dizel motorlarda, yakıtın iyi parçalanması için enjektör çıkış hızları artırılmıştır. Bu durum küçük yanma odası hacmine sahip motorlarda, yakıt demetinin karşı cidara çarparak burada bir miktar yakıtın toplanması ile sonuçlanmaktadır. Bu nedenle, silindir başına küçük strok hacimli motorlarda HC emisyonu artış göstermektedir [6, 79, 85, 100].

#### 4.5.5. Duman koyuluğu

Yanma bölgesindeki karbonları CO<sub>2</sub> dönüştürecek kadar oksijen bulunmazsa yakıtça zengin bölgelerde katı karbon parçacıkları oluşmaktadır. Bu durum egzoz dumanı ve koku kirliliği olarak ortaya çıkmaktadır. Dizel motorlarında meydana gelen difüzyon alevinde, genel olarak hidrojen karbona oranla oksijene karşı daha aktiftir. Bu yüzden karbonun tam yanabilmesi için zamana ve yeterli oksijene ihtiyaç vardır. Partikül emisyonların yoğunluğu motor yüküne bağlı olarak değişir. Yükleme arttıkça partikül emisyonu da artar. Dizel motorlarında gücü artırmak için fazla miktarda yakıt gönderildiğinde, yeterli oksijen bulunmadığı için egzoz gazlarındaki is miktarı artar [2, 4].

## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

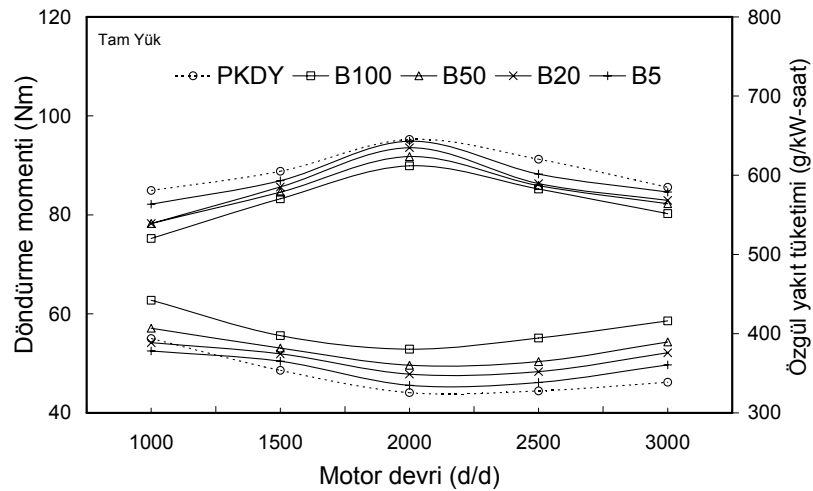
Bu bölümde, tam yük, 60, 40, 20 Nm sabit yük ve değişik devirlerde (1000, 1500, 2000, 2500, 3000 d/d) PKDY, B100, B50, B20 ve B5 kullanılarak yapılan testlerde, döndürme momenti, özgül yakıt tüketimi, efektif güç, termik verim, egzoz gazı sıcaklığı, silindir gaz basıncı, ısı dağılımı, yakıt hattı basıncı, tutuşma gecikmesi, karbon monoksit, karbon dioksit, yanmamış hidrokarbon, NO<sub>x</sub> emisyonu, duman koyuluğu ve oksijen yüzdesi sonuçları incelenecektir.

### 5.1. Tam Yük Motor Test Sonuçlarının Analizi

#### 5.1.1. Performans karakterlerinin karşılaştırılması

##### 5.1.1.1. Döndürme momenti ve özgül yakıt tüketiminin karşılaştırılması

Motor performans karakterlerinin karşılaştırılmasında iki temel parametre; döndürme momenti ve özgül yakıt tüketimidir. Şekil 5.1'de tam yük ve değişik devirlerde döndürme momenti ve özgül yakıt tüketiminin değişimi gösterilmektedir.



Şekil 5.1: Tam yük ve değişik devirlerde döndürme momenti ve özgül yakıt tüketimi değişimi

Deneilerin yapıldığı test motorunda, biyodizel ve karışımlarının kullanımı ile motor performansında hafif bir düşme meydana gelmiştir. Maksimum döndürme momenti 2000 d/d'da, PKDY için 95,23 Nm, B5 için 94,90 Nm, B20 için 93,57 Nm, B50 için 91,79 Nm, B100 için 89,91 Nm olarak ölçülmüştür. Karışım içerisinde biyodizelin artan yüzdesi ile birlikte döndürme momentinde azalma meydana gelmiştir. Ortalama olarak B100, B50, B20, B5, kullanımı ile döndürme momentinde, sırasıyla %7,16, %5,6, %4,28, %2,01 PKDY'a göre azalma olmuştur.

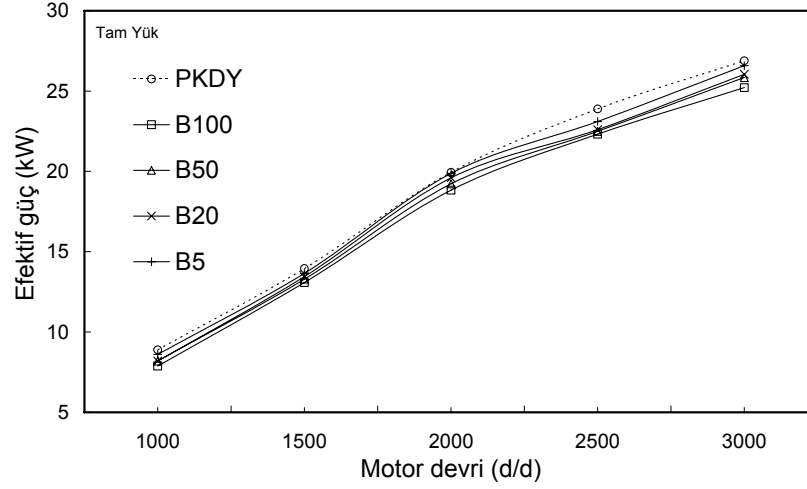
Maksimum döndürme momentinin üretildiği 2000 d/d'da tüm yakıtlar için özgül yakıt tüketimi en düşük değerde olduğu grafikte görülmektedir. Bu durum, özgül yakıt tüketiminin, döndürme momenti ile ters orantılı olmasından kaynaklanmaktadır. 2000 d/d'daki motor testinde özgül yakıt tüketimi, PKDY için 325,50, B5 için 334,70, B20 için 348,81, B50 için 360,13, B100 için 380,36 g/kW-saat olarak hesaplanmıştır. Özgül yakıt tüketiminin hesaplanmasında kullanılan formül önceki bölümde denklem 4.8'de verilmiştir. Biyodizelin özgül yakıt tüketimi, tüm motor devirlerinde PKDY'a göre daha yüksektir. Ortalama olarak B100, B50, B20 ve B5'in özgül yakıt tüketimi, sırasıyla %16,76, %9,42, %5,78, %2,17 PKDY'a kıyasla daha fazladır. Ortalama değerlere bakıldığında biyodizelin karışım içerisindeki yüzdesi ile ilişkili olarak özgül yakıt tüketiminde artış görülmektedir. Biyodizel ve karışımlarının özgül yakıt tüketiminin yüksek olmasının temel nedeni biyodizelin enerji içeriğinin PKDY'a göre daha az olmasıdır. Ayrıca, biyodizelin yoğunluğunun PKDY'a göre daha yüksek olması hacimsel olarak püskürtülen yakıt miktarının kütsel olarak daha fazla çıkmasına neden olmaktadır. Yapılan testlerde tüm yakıtlar için maksimum yakıt tüketimi 1000 d/d'da ortaya çıkmıştır. Düşük motor hızlarında döngüsel hava hareketlerinin az olmasından dolayı hava-yakıt karışım reaksiyon hızı yavaşlamaktadır. Bu yüzden, PKDY'a göre yüksek kaynama noktasına sahip olan B100, 1000 d/d'da maksimum özgül yakıt tüketimini (442,24 g/kW-saat) göstermiştir. Ayrıca, testlerde kullanılan motorun mekanik kontrollü bir pompaya sahip olması ve B100'ün viskozitesinin PKDY'a oranla biraz daha yüksek olması, özellikle düşük devirlerde atomizasyon oranını etkilemektedir. İyi atomize olamayan yakıt, reaksiyon bölgelerinde azalmaya neden olduğundan özgül yakıt tüketiminde artış ortaya çıkarmaktadır. Aynı zamanda, düşük devirlerde motorun



hareketli parçalarındaki atalet kuvvetlerinin fazla olması da özgül yakıt tüketimini artırmaktadır.

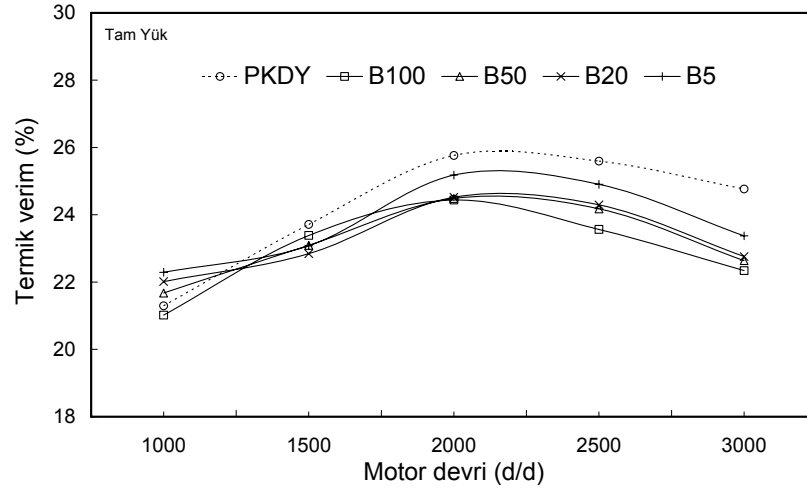
### 5.1.1.2. Efektif gücün ve termik verimin karşılaştırılması

Tam yük ve değişken hız şartlarında efektif güç, karışımda artan biyodizel yüzdesi ile azalma göstermiştir. Tam yük şartlarında biyodizel yüzdesi ile motor gücündeki azalmanın temel nedeni, artan biyodizel yüzdesi ile elde edilen döndürme momentinin düşmesidir. Maksimum efektif güç 3000 d/d'da, PKDY için 26,88 kW, B5 için 26,58 kW, B20 için 26,05 kW, B50 için 25,84 kW, B100 için 25,21 kW olarak hesaplanmıştır. Efektif gücün hesaplanmasında kullanılan formül önceki bölümde denklem 4.4'de verilmiştir. Şekil 5.2'de tam yükte efektif gücün motor devri ile değişimi gösterilmektedir.



Şekil 5.2: Tam yük ve değişik devirlerde efektif güç değişimi

İçten yanmalı motorlarda yanma sonucu elde edilen enerji, ısı transferi kayıpları nedeniyle tamamıyla yararlı işe dönüşmemektedir. Termik verim, alternatif yakıtlar için yapılan çalışmalarda motor performansının değerlendirilmesi açısından önemli bir parametredir. Termik verim, motordan elde edilen efektif gücün motora sürülen enerji miktarına bölünmesi ile hesaplanmıştır. Hesaplama kullanılan formül önceki bölümde denklem 4.20'de verilmiştir. Tam yük motor testlerinde termik verim %21–26 arasında değişim göstermiştir. Şekil 5.3'de test yakıtları için termik verimin motor devri ile değişimi gösterilmektedir.

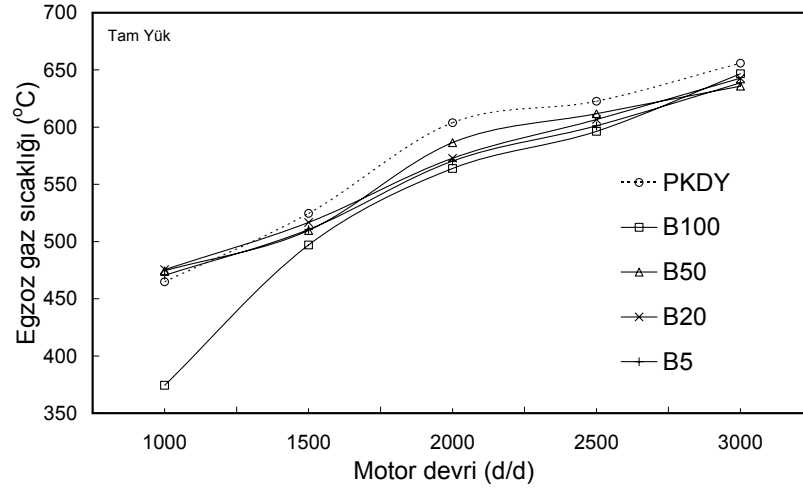


Şekil 5.3: Tam yük ve değişik devirlerde termik verimin değişimi

Tam yük şartlarında, biyodizel ve karışımlarının kullanılması ile termik verimde azalma olmuştur. Tüm yakıtlar için maksimum termik verim özgül yakıt tüketiminin minimum olduğu 2000 d/d'da elde edilmiştir. Maksimum termik verim 2000 d/d'da, PKDY için %25,76, B5 için %25,18, B20 için 24,52, B50 için %24,48, B100 için %24,44, olarak hesaplanmıştır. Ortalama olarak B100, B50, B20, B5 kullanımı ile termik verimde, PKDY'ya göre sırasıyla %1,28, %1,01, %0,94, %0,46 azalma olmuştur. Termik verimdeki azalmanın nedeni, biyodizel ve karışımlarının kullanılması ile elde edilen efektif işin azalması, özgül yakıt tüketiminin artması ve biyodizelin enerji içeriğinin PKDY'ya göre daha az olmasıdır.

### 5.1.1.3. Egzoz gazı sıcaklıklarının karşılaştırılması

Egzoz gaz sıcaklığı, test edilen yakıtların yanma periyodundaki sıcaklıklarının bir göstergesi olduğundan ölçülerek tespit edilmiştir. Tüm testlerde elde edilen egzoz sıcaklığı, yüksek devirli, doğal emişli ön yanma odalı bir dizel motor için normal bir seyir izlemiştir. Genelde, ön yanma odalı dizel motorlar aynı silindir hacmine sahip DP dizel motorlara göre daha yüksek egzoz sıcaklığı gösterebilmektedir. Şekil 5.4'de tam yük ve değişik devirlerde ölçülen egzoz gaz sıcaklıklarının değişimi gösterilmektedir. Testlerde maksimum egzoz sıcaklığı 3000 d/d'da, PKDY için 655,9°C, B5 için 635,8°C, B20 için 642,7°C, B50 için 638,7°C, B100 için 646,6°C olarak ölçülmüştür



Şekil 5.4: Tam yük ve değişik devirlerde egzoz gaz sıcaklıklarının değişimi

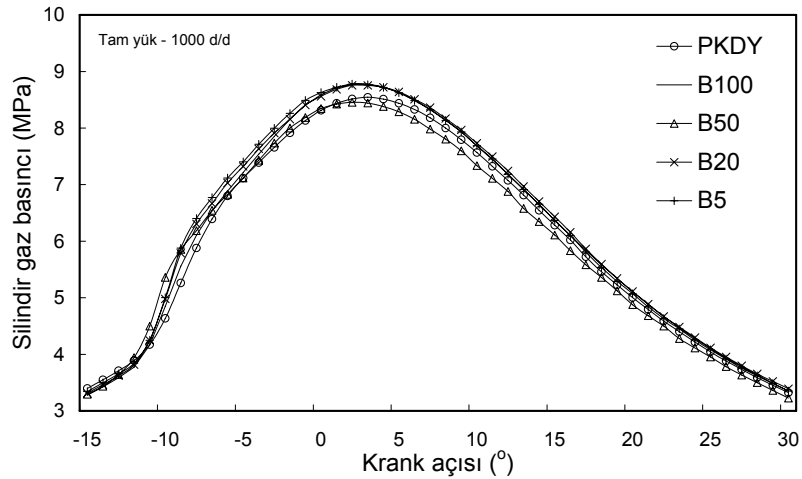
Şekil 5.4’de görüldüğü gibi, B100’ün 1000 devirdeki ölçüm değeri hariç egzoz sıcaklıklarında önemli bir fark yoktur. 1000 d/d’da B100 kullanımı ile maksimum yakıt tüketimi gerçekleştiğinden, yakıt buharlaşmasının egzoz supabının açılımına kadar sürdüğü tahmin edilmektedir. Biyodizel ve karışımlarının kullanımı ile egzoz sıcaklığının düşmesinin temel nedeni, biyodizelin ve karışımlarının PKDY’ya göre püskürtme başlangıcının daha erken olmasıdır. Püskürtme başlangıcı geliştikçe ısı dağılımında yükselme daha erken olduğu için silindir sıcaklığında soğuma daha erken başlamaktadır. Egzoz sıcaklığının düşmesinde diğer önemli etken biyodizel ve karışımlarının kullanılması ile PKDY’ya göre maksimum yükün farklı değerlerde elde edilmesidir.

## 5.1.2. Yanma ve püskürtme karakterlerinin karşılaştırılması

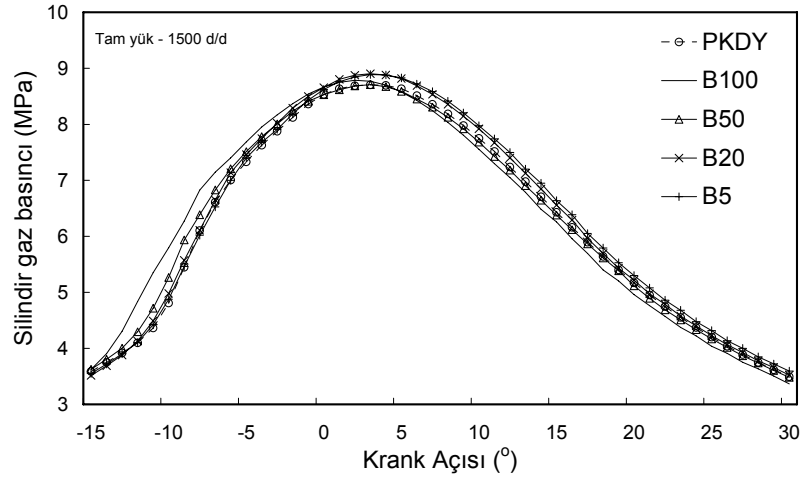
### 5.1.2.1. Silindir gaz basınçlarının karşılaştırılması

Tam yük ve değişik devirlerde elde edilen silindir gaz basıncının KA’ya göre değişimi Şekil 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9’da gösterilmektedir. Grafiklerde görüldüğü üzere, genelde B100 kullanımı ile silindir gaz basıncının PKDY’ya göre daha yüksek olduğu ve üst ölü noktaya (ÜÖN) biraz daha yaklaştığı ortaya çıkmıştır. Tam yük ve değişik motor devirlerinde maksimum silindir gaz basıncı 2,5° ile 6° KA arasında gerçekleşmiştir. Tüm yakıtlar için silindir gaz basıncı motor devrinin artması ile artmıştır. Devir arttıkça silindir gaz basıncının daha yüksek olması; püskürtme

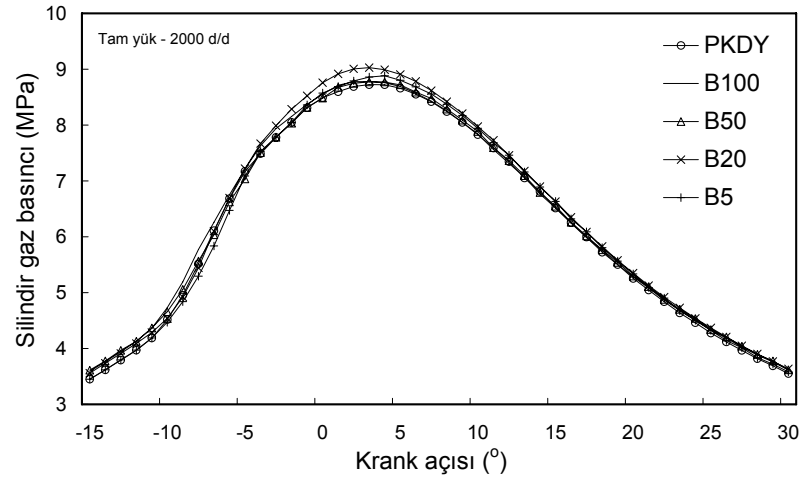
başlangıcının daha erken, birim zamanda tüketilen yakıt miktarının daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, motor devri arttıkça silindir gaz basıncının yükselme noktası daha erken gerçekleşirken, silindir gaz basıncının genişleme noktaları ÜÖN'dan uzaklaşmaktadır. Motor devri 2500, 3000 d/d'ya ulaştığında maksimum silindir basınç tepelerinin KA cinsinden 1000, 1500 ve 2000 devire göre daha geniş bir aralıkta basıncını sürdürdüğü görülmüştür. Bu durum, motor devri arttıkça silindir gaz basıncı altında kalan alanın büyüdüğünü göstermektedir. Tüm yakıtlar aynı yapı içinde silindir gaz basıncı oluşumunu sergilemiştir. Tüm devirlerde, biyodizel ve karışımlarının PKDY benzer yanma olayını sergilemesi biyodizelin PKDY'nin yerini alabilecek güçlü bir alternatif yakıt olduğunu göstermektedir. Tüm tam yük testlerinde B100 kullanımı ile silindir gaz basıncının artışı daha erken başlamış, kontrollü yanma safhası PKDY'ye benzer genişleme göstermiştir. B100'ün PKDY göre yanma veya oksidasyonun erken başlaması, B100'ün PKDY göre püskürtme başlangıcının daha erken ve tutuşma gecikmesi süresinin daha kısa olmasından kaynaklanmaktadır. 1000, 1500, 2000, 2500 devirlerde B5 ve B20 kullanımı ile maksimum silindir basınçları elde edilmiştir. B5 ve B20 karışımlarındaki bu basınç artışında, biyodizelin oksijen içeriği ve PKDY'nin ısı değeri etkili olduğu düşünülmüştür. Tüm test yakıtları için kontrollü yanma safhasında düzgün yanma karakteristikleri izlenmiştir. Bu durum, tam yük şartlarında tüm yakıtların motorda benzer mekanik yüklemeler oluşturduğunu göstermesi açısından önemlidir. Özellikle maksimum yükün elde edildiği 2000 d/d'da, tüm yakıtların silindir gaz basıncı karakteristiklerinin birbirine çok benzemesi ön yanma odalı dizel motorların yakıt kalitesine bağlı motorlar olmadığını göstermektedir.



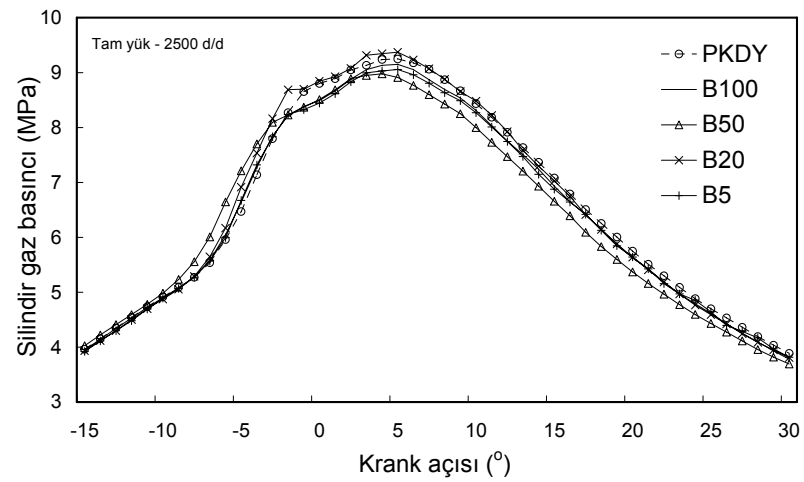
Şekil 5.5: Tam yük ve 1000 d/d'da silindir gaz basıncının KA'ya göre değişimi



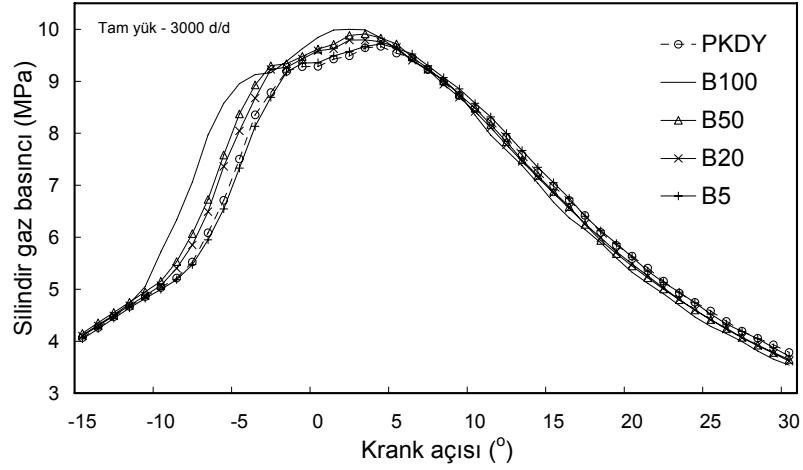
Şekil 5.6: Tam yük ve 1500 d/d'da silindir gaz basıncının KA'ya göre değişimi



Şekil 5.7: Tam yük ve 2000 d/d'da silindir gaz basıncının KA'ya göre değişimi



Şekil 5.8: Tam yük ve 2500 d/d'da silindir gaz basıncının KA'ya göre değişimi

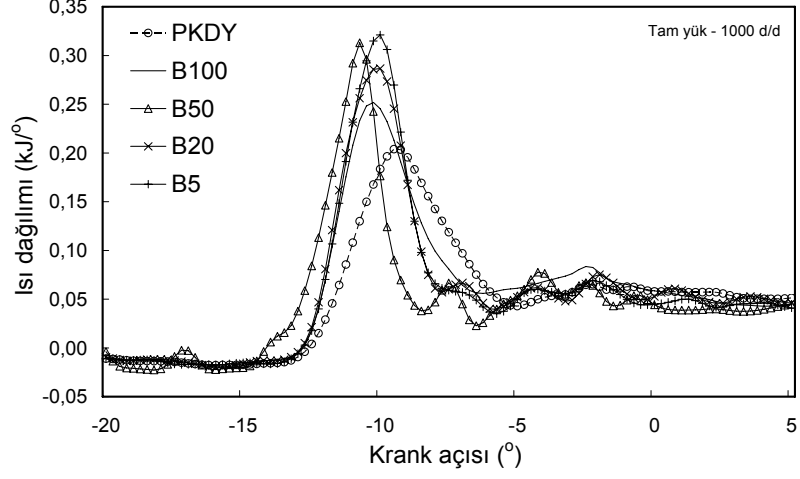


Şekil 5.9: Tam yük ve 3000 d/d'da silindir gaz basıncının KA'ya göre değişimi

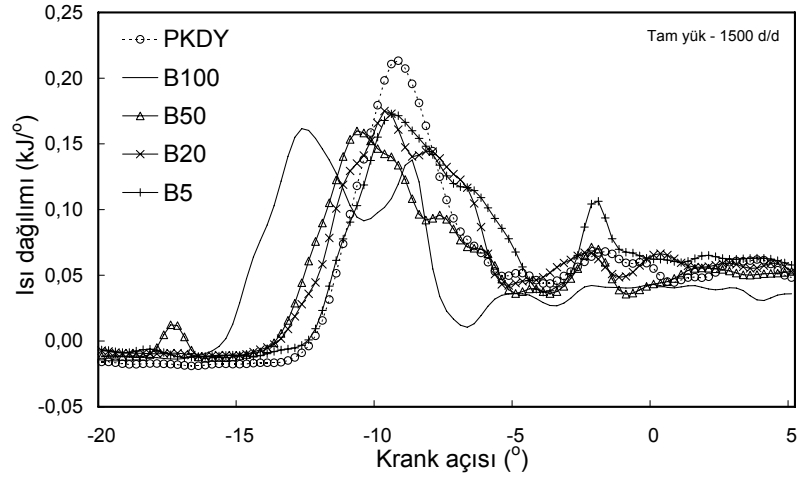
### 5.1.2.2. Isı dağılımlarının karşılaştırılması

İçten yanmalı motorlarda kullanılan yakıtların fiziksel ve kimyasal özellikleri, yanma sonu ortaya çıkacak olan ısı dağılımını etkileyen parametrelerdir. Isı dağılımında oluşan safhalar önceki bölümde ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Isı dağılımında ani çıkışın olduğu aralık kontrolsüz yanma safhasını göstermektedir. Bölüm 4.4.1. Dizel motorlarda yanma başlığı altında bu safhalar ayrıntılı olarak verilmiştir. Tüm testlerde biyodizel kullanıldığı zaman ısı dağılımı başlangıcı PKDY'a göre daha erken olmuştur. Biyodizelin uçuculuğunun PKDY'a göre daha düşük olmasına rağmen böyle bir sonuç ortaya çıkmıştır. Bu sonuç, biyodizelin PKDY'a göre püskürtme başlangıcının daha erken ve tutuşma gecikmesi süresinin daha kısa olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, biyodizelin bünyesinde bulunan oksijenin, buhar fazındaki yakıtın oksidasyon hızını arttırdığı düşünülmüştür. Biyodizelin ısı dağılımı PKDY göre daha erken olmasına ve biyodizel kullanımı ile tam yük şartlarında motor yükünün değişmesine rağmen, KA cinsinden tamamen farklı bir noktada ısı dağılımı alanı görülmemiştir. Biyodizel ve karışımların ısı dağılımındaki tepe noktaların PKDY ile benzer KA aralığında gerçekleşmesi, maksimum silindir gaz basınçlarının benzer KA'da olmasına neden olmuştur. Biyodizelin ani ısı dağılımındaki tepe noktasının biraz daha geniş olması, biyodizel kullanımı ile özgül yakıt tüketiminin artmasından ve biyodizelin buharlaşma eğrisinin PKDY göre daha yatay olmasından kaynaklanmaktadır. Isı dağılımı başlangıcından önce, ısı dağılımının negatif değerde seyretmesi, püskürtülen yakıtın buharlaşması için ortam

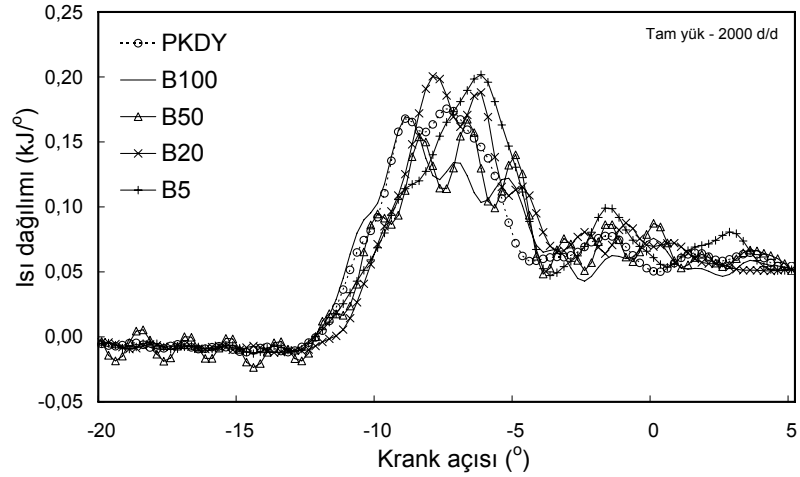
havasından ısı çekmesi sonucu sıcaklık değerinin düşmesinden kaynaklanmaktadır. Şekil 5.10, 5.11, 5.12, 5.13, 5.14'de tam yük ve değişik devirlerde ısı dağılımının KA'ya göre değişimi gösterilmektedir.



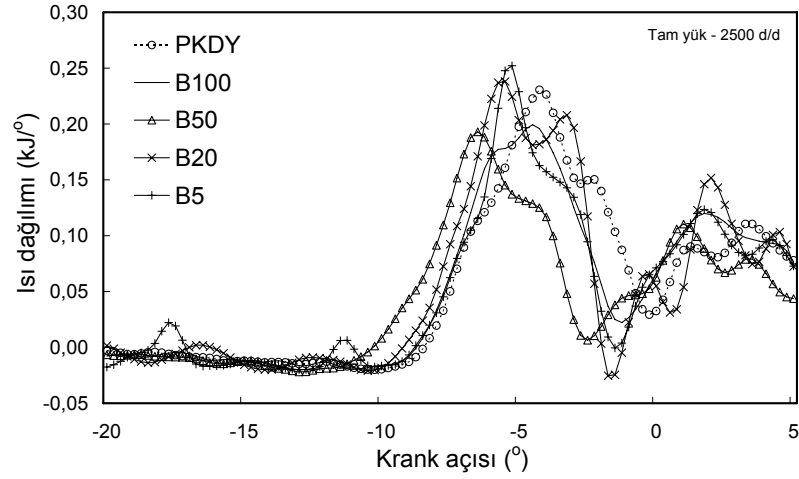
Şekil 5.10: Tam yük ve 1000 d/d'da ısı dağılımının KA'ya göre değişimi



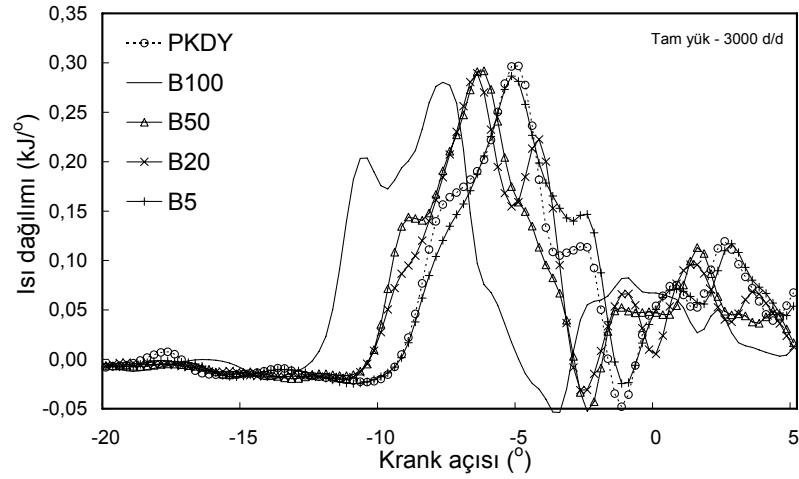
Şekil 5.11: Tam yük ve 1500 d/d'da ısı dağılımının KA'ya göre değişimi



Şekil 5.12: Tam yük ve 2000 d/d'da ısı dağılımının KA'ya göre değişimi



Şekil 5.13: Tam yük ve 2500 d/d'da ısı dağılımının KA'ya göre değişimi



Şekil 5.14: Tam yük ve 3000 d/d'da ısı dağılımının KA'ya göre değişimi

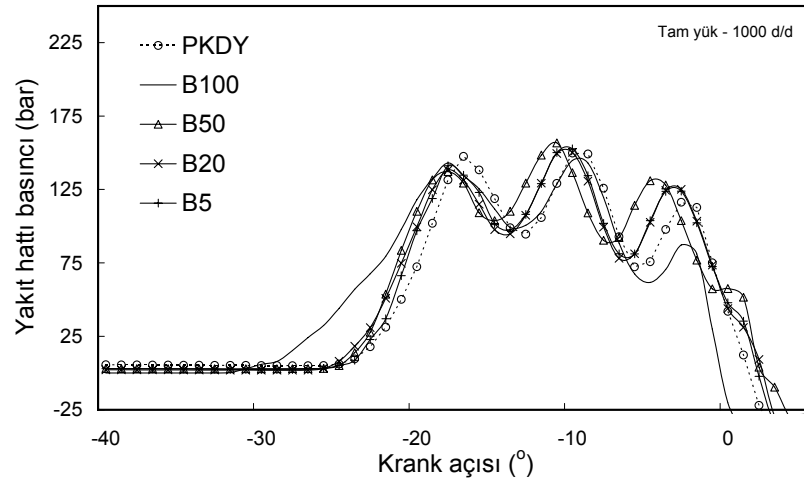
Şekil 5.11 ve 5.14'de B100, B50 ve B20 ısı dağılımı başlangıçlarının PKDY ve B5'e göre daha erken olduğu açıkça görülmektedir. Maksimum döndürme momentinin elde edildiği 2000 ve 2500 d/d'da ise tüm yakıtlar neredeyse birbirine benzer ısı dağılımı eğrileri sergilemiştir. 1000 d/d'da B100, B50, B20 ve B5'in PKDY'a göre özgül yakıt tüketimleri daha fazla olduğu için maksimum ısı dağılım noktaları PKDY'a göre daha yüksektir.

### 5.1.2.3. Yakıt hattı basınçlarının ve tutuşma gecikmesinin karşılaştırılması

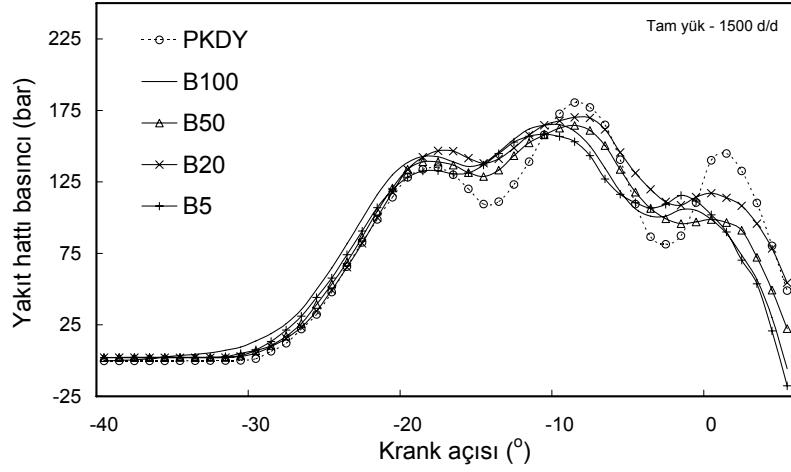
Yakıt hattında oluşacak basınç değişimi ve yakıtın sıkıştırılabilirliği püskürtme başlangıcını, buna bağlı olarak yanma başlangıcını ve tutuşma gecikmesini



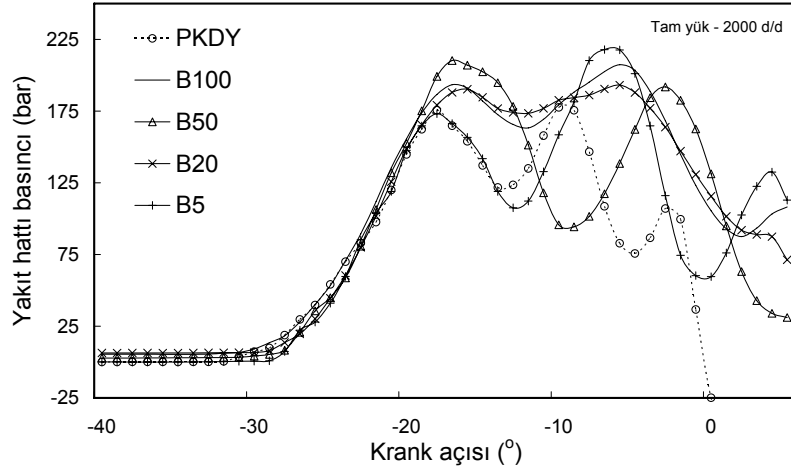
etkileyecektir. Tam yük testlerinde, biyodizel kullanımı ile püskürtme başlangıcı PKDY'ya göre daha erken olmuştur. Tablo 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 ve 5.5'de püskürtme başlangıcının motor devrine göre değişimi KA cinsinden verilmektedir. Biyodizel kullanımı ile püskürtme başlangıcının PKDY'ya göre daha erken olması, biyodizelin PKDY'ya göre viskozitesinin ve yoğunluğunun daha yüksek, sıkıştırılabilirliğinin ise daha az olmasından kaynaklanmaktadır. Literatürde, Kegl, [102] biyodizelin yüksek viskozitesinin püskürtme prosesini hızlandığını, böylece daha erken püskürtme başlangıcının gerçekleştiğini ifade etmiştir. Yamane ve diğ. [103], Tat ve diğ. [104], Rodriguez-Anton ve diğ. [105] püskürtme başlangıcındaki değişimin yakıtların sıkıştırılabilirliklerinden kaynaklandığını göstermişlerdir. Araştırmacılar, biyodizelin sıkıştırılabilirliğinin PKDY'ya göre daha az olduğunu, bu yüzden aynı püskürtme şartlarında biyodizel ile PKDY arasında farklılıklar bulunduğunu ifade etmişlerdir. Şekil 5.15, 5.16, 5.17, 5.18, 5.19'da tam yük ve değişik devirlerde yakıt hattı basıncının KA'ya göre değişimi gösterilmektedir.



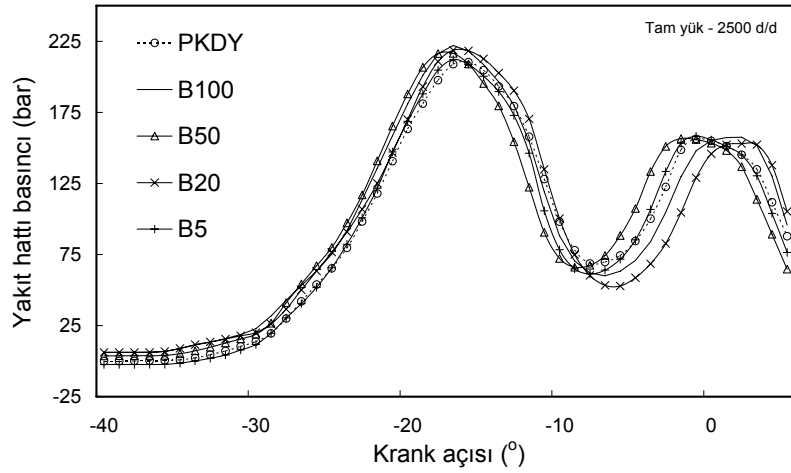
Şekil 5.15: Tam yük ve 1000 d/d'da yakıt hattı basıncının KA'ya göre değişimi



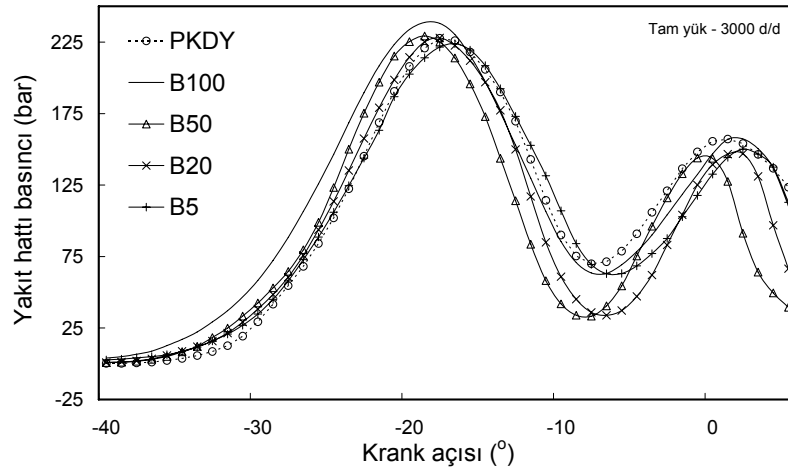
Şekil 5.16: Tam yük ve 1500 d/d'da yakıt hattı basıncının KA'ya göre değişimi



Şekil 5.17: Tam yük ve 2000 d/d'da yakıt hattı basıncının KA'ya göre değişimi



Şekil 5.18: Tam yük ve 2500 d/d'da yakıt hattı basıncının KA'ya göre değişimi



Şekil 5.19: Tam yük ve 3000 d/d'da yakıt hattı basıncının KA'ya göre değişimi

B100 için püskürtme başlangıcı PKDY'ya göre 1000, 1500, 2000, 2500, 3000 d/d'da sırasıyla 1,12°, 1,21°, 0,66°, 0,81°, 2,14° KA daha erken oluşmuştur. Tüm devirlerde B5'in püskürtme başlangıcı PKDY'ya benzemektedir. Tüm yakıtlar için püskürtme süresi KA cinsinden devir arttıkça artmıştır. Ayrıca, püskürtme başlangıcı motor devri arttıkça her yakıt için ÜÖN'dan uzaklaşmıştır. Bu durum, motor devri arttıkça her yakıt için birim zamanda daha fazla yakıt püskürtülmesi gerekliliğinden kaynaklanmaktadır. Maksimum döndürme momentinin elde edildiği 2000 d/d şartları hariç tüm devirlerde yakıtların maksimum yakıt hattı basınçları ve püskürtme eğilimleri birbirine benzer bir yapı sergilemiştir. 2000 d/d'da her yakıt için farklı maksimum motor yükünün elde edilmesi farklı yapıda boşalma karakteristiklerinin oluşmasına neden olmuştur.

Yanma olayında en önemli safhalardan birisi tutuşma gecikmesi safhasıdır. Tutuşma gecikmesi safhası, yakıtın silindire püskürtülmesi ile alevin ilk görüldüğü an arasındaki mesafedir. Tutuşma gecikmesi yakıt özelliklerinden, motorun sıkıştırma oranından, silindir gaz basıncından, emme havası sıcaklığından, atomizasyon oranından önemli derecede etkilenmektedir. Tablo 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5'de görüldüğü üzere tüm testlerde B100, B50 ve B20, PKDY'ya göre KA cinsinden daha kısa bir tutuşma gecikmesine sahiptir. B100'ün PKDY'ya oranla uçuculuğunun daha düşük, viskozitesinin de daha yüksek (azalan atomizasyon) olmasına rağmen böyle bir eğilim ortaya çıkmıştır. Benzer sonuçlar literatürde de bulunmaktadır [31, 106]. B100 kullanımı ile tutuşma gecikmesi süresinin kısalmasındaki temel etken, B100'ün

setan sayısının PKDY'ya göre daha yüksek olmasıdır. Tablo 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5'de tam yük ve değişik devirlerde püskürtme ve ısı dağılımı başlangıçları, tutuşma gecikmesi süresi KA cinsinden verilmektedir. Motor devrinin artmasıyla birim zamanda silindir içerisine alınan yakıt miktarı ve silindir gaz basıncı artmaktadır. Motor devri arttıkça KA cinsinden tutuşma gecikmesi süresi artmıştır.

Tablo 5.1: Tam yük ve 1000 d/d'da tutuşma gecikmesi

1000 d/d				
Yakıt	PB(°)	IDB (°)	TG (°)	TGS (sn)
PKDY	18,06	13,25	4,81	0,000802
B100	19,18	15,00	4,18	0,000697
B50	19,11	14,75	4,36	0,000727
B20	18,76	14,25	4,51	0,000752
B5	18,59	14,00	4,59	0,000765

PB -Püskürtme Başlangıcı, IDB -Isı Dağılımı Başlangıcı,  
TG -Tutuşma Gecikmesi, TGS -Tutuşma Gecikmesi Süresi

Tablo 5.2: Tam yük ve 1500 d/d'da tutuşma gecikmesi

1500 d/d				
Yakıt	PB(°)	IDB (°)	TG (°)	TGS (sn)
PKDY	19,78	13,25	6,53	0,000726
B100	20,99	16,50	4,49	0,000499
B50	20,38	14,75	5,63	0,000626
B20	20,25	13,75	6,50	0,000722
B5	19,70	13,25	6,45	0,000748

Tablo 5.3: Tam yük ve 2000 d/d'da tutuşma gecikmesi

2000 d/d				
Yakıt	PB(°)	IDB (°)	TG (°)	TGS (sn)
PKDY	20,59	13,00	7,59	0,000633
B100	21,25	14,00	7,25	0,000604
B50	21,09	12,75	8,34	0,000695
B20	20,83	12,50	8,33	0,000694
B5	20,66	12,75	7,91	0,000659

Tablo 5.4: Tam yük ve 2500 d/d'da tutuşma gecikmesi

2500 d/d				
Yakıt	PB(°)	IDB (°)	TG (°)	TGS (sn)
PKDY	21,43	10,00	11,43	0,000762
B100	22,24	11,50	10,74	0,000716
B50	22,42	11,75	10,67	0,000711
B20	21,76	10,50	11,26	0,000751
B5	21,64	10,25	11,39	0,000748

Tablo 5.5: Tam yük ve 3000 d/d'da tutuşma gecikmesi

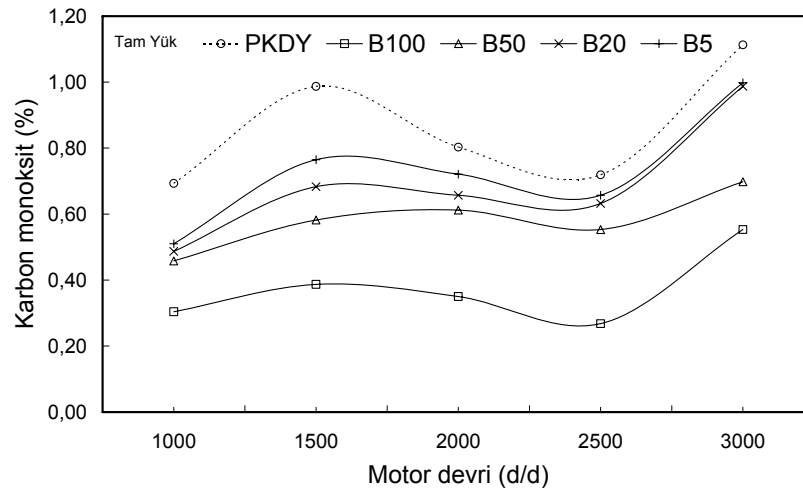
3000 d/d				
Yakıt	PB(°)	IDB (°)	TG (°)	TGS (sn)
PKDY	23,66	10,50	13,16	0,000731
B100	25,80	14,00	11,80	0,000656
B50	24,76	11,25	13,51	0,000751
B20	24,23	11,25	12,98	0,000721
B5	23,71	10,25	13,46	0,000748

Tablo 5.1'de görüldüğü gibi 1000 d/d'da tüm yakıtlar KA cinsinden birbirine benzer tutuşma gecikmesi göstermiştir. Bu durum, B100, B50, B20, B5, püskürtme başlangıçlarının PKDY'ya göre sırasıyla 1,12°, 1,05°, 0,7°, 0,53° KA daha erken olmasına rağmen ortaya çıkmıştır. Tutuşma gecikmesinde maksimum fark PKDY ile B100 arasında, 1500 ve 3000 devirlerde, sırasıyla 2,04°, 1,36°KA olarak ortaya çıkmıştır.

### 5.1.3. Egzoz emisyon karakterlerinin karşılaştırılması

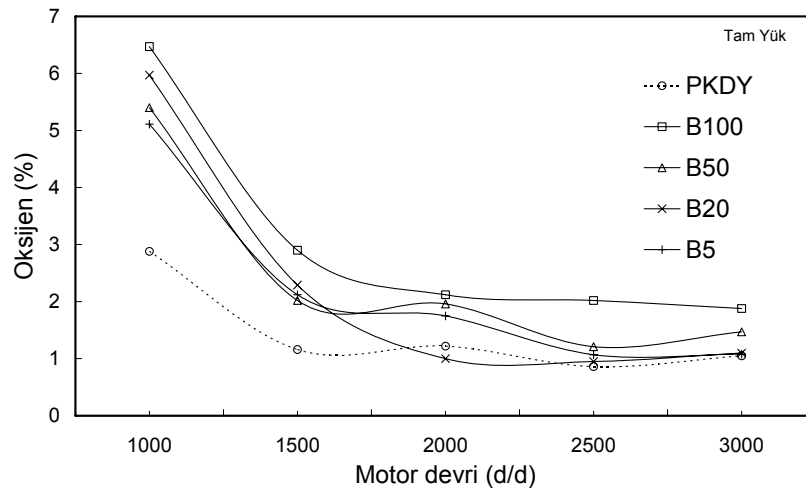
#### 5.1.3.1. CO emisyonlarının karşılaştırılması

CO sınırlaması emisyon standartlarının temel parametrelerindedir. Yanma ürünleri arasında CO bulunmasının ana nedeni hava-yakıt oranının düşük olmasıdır [4]. Şekil 5.20'de tam yük ve değişik devirlerde elde edilen karbon monoksit yüzdesinin değişimi gösterilmektedir.



Şekil 5.20: Tam yük ve değişik devirlerde karbon monoksit (CO) yüzdesinin değişimi

Yakıt özellikleri, püskürtme karakteristikleri, motor yükü, hava-yakıt oranını önemli derecede etkilediğinden, CO oluşumu bu parametrelerin bir fonksiyonu olarak değişmektedir. CO emisyonu motorda kullanılmayan kayıp kimyasal enerjiyi ifade ettiği için de önemli bir parametredir. Tüm devirlerde B100, B50, B20 ve B5 kullanımıyla elde edilen CO emisyonu, PKDY kullanımına göre azalma göstermiştir. Bu durum, biyodizel ve karışımlarının özgül yakıt tüketiminin PKDY'ya oranla daha yüksek olmasına rağmen gerçekleşmiştir. Biyodizel ve karışımlarının kullanılması ile CO emisyonundaki azalmanın temel nedeni biyodizelin içeriğindeki oksijendir. Karışımdaki biyodizel yüzdesi ile orantılı olarak CO emisyonunda azalma olması biyodizel kullanımı ile silindir içerisindeki hava-yakıt oranının geliştiğini göstermektedir. Şekil 5.21'de tam yük ve değişik devirlerde egzozdaki oksijen yüzdesinin değişimi gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde, biyodizel ve karışımlarının kullanımı ile PKDY'ya göre egzozdan daha fazla oksijen saldıgı gözlenmektedir. Bu durum, biyodizel ve karışımlarının PKDY'ya göre hava-yakıt oranının daha düşük olmasına rağmen ortaya çıkmıştır.



Şekil 5.21: Tam yük ve değişik devirlerde oksijen (O<sub>2</sub>) yüzdesinin değişimi

B100, B50, B20 ve B5 kullanımıyla ölçülen CO emisyonunda PKDY'ya göre ortalama olarak, sırasıyla %56,85, %32,72, %20,14 ve %15,39 azalma görülmüştür. Tüm yakıtlar için maksimum CO emisyonu 3000 d/d'da ölçülmüştür. Motor devri yükseldikçe volumetrik verim azaldığından, silindir içerisinde artık egzoz gazı yüzdesi artmaktadır. Dizel motorlar hava fazlalığı ile çalışan motorlar olduğundan 2500 d/d'ya kadar CO emisyonu yataya yakın bir eğri izlemiştir. 3000 d/d'da ise CO

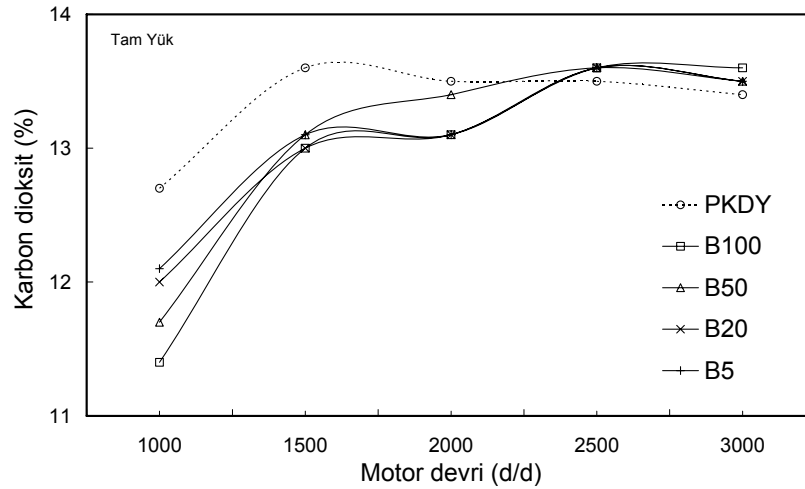
emisyonunda ani artış eğilimi gözlenmektedir. 1500 d/d'daki test şartlarında, tüm yakıtlar için hava-yakıt oranı, 1000, 2000, 2500 d/d'da yapılan testlere nazaran daha düşük olduğu için, bu devirde CO oluşumunda artış ortaya çıkmıştır. Tablo 5.6'da tam yük için motor devrine göre hava-yakıt oranlarının değişimi verilmektedir.

Tablo 5.6: Tam yükte motor devrine göre hava-yakıt oranları

Yakıt	1000	1500	2000	2500	3000
PKDY	15,31	14,17	15,31	15,18	14,65
B100	15,99	13,45	14,06	13,62	12,82
B50	15,94	14,05	14,29	14,27	13,03
B20	16,91	13,94	14,61	15,43	13,74
B5	16,48	14,02	15,01	15,42	14,04

### 5.1.3.2. CO<sub>2</sub> emisyonlarının karşılaştırılması

Egzoz ürünleri arasında bulunan CO<sub>2</sub> tam yanmayı ifade ettiğinden önemli bir parametredir. Bugün dünyanın en önemli çevre sorunu olan küresel ısınmada temel etkenlerden biri, artan CO<sub>2</sub> emisyonunun atmosferde sera etkisi göstermesidir. Bazı araştırmacılar, biyodizel kullanımı ile atmosfere salınan CO<sub>2</sub> emisyonunun fotosentez çevrimine katıldığını düşünmektedir [107]. Şekil 5.22 tam yük ve değişik devir ile karbon dioksit yüzdesinin değişimini göstermektedir.

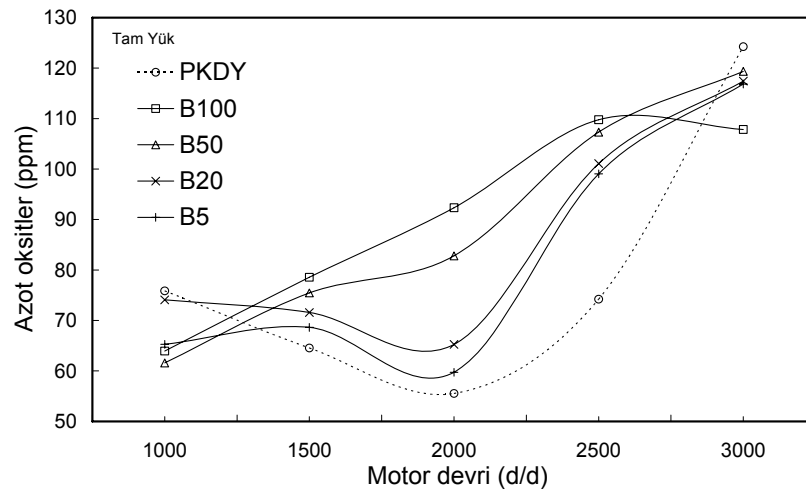


Şekil 5.22: Tam yük ve değişik devir ile karbon dioksit (CO<sub>2</sub>) yüzdesinin değişimi

Biyodizel ve karışımlarının kullanılmasıyla CO<sub>2</sub> emisyonunda 1000, 1500, 2000 d/d'da azalma olurken 2500 ve 3000 d/d'da artış gözlemlenmiştir. Biyodizel kullanımı ile 1000, 1500, 2000 d/d'da PKDY'ya oranla sırasıyla %10,2, %4,4 ve %3 azalma görülürken, 2500, 3000 d/d'da ise sırasıyla %0,7, %1,5 artış olmuştur. Motor devri arttıkça volumetrik verim azaldığından PKDY'nın tam yanma eğilimi azalmıştır. Devir yükseldikçe, biyodizelin içeriğindeki oksijen, silindir içerisindeki oksijen-yakıt reaksiyonlarını desteklediği düşünülmüştür. Ayrıca, biyodizel ve karışımlarının düşük motor hızlarındaki püskürtme karakteristikleri (atomizasyon oranının azalması vb. gibi) CO<sub>2</sub> oluşumunu etkilemiştir. Ortalama olarak, B100, B50, B20 ve B5 kullanımıyla ölçülen CO<sub>2</sub> emisyonunda PKDY'ya oranla sırasıyla %3, %2,10, %2,25 ve %1,95 azalma gözlenmiştir.

### 5.1.3.3. NO<sub>x</sub> emisyonlarının karşılaştırılması

Yanma sonucu ulaşılan yüksek sıcaklıklarda, havanın içerisindeki azotun oksijen ile birleşmesi sonucu azot oksitler meydana gelmektedir. Atmosferdeki nemin NO<sub>x</sub> emisyonlarını azaltıcı yönde bir etkisi olduğu bilinmektedir [86]. Bu yüzden bölüm 4.5'de tanımlanan nem düzeltme faktörü kullanılarak gerçek NO<sub>x</sub> değeri hesaplanmıştır. Tam yük ve değişik devirde düzeltme faktörü ile çarpılarak elde edilen azot oksitlerin değişimi Şekil 5.23'de gösterilmiştir.



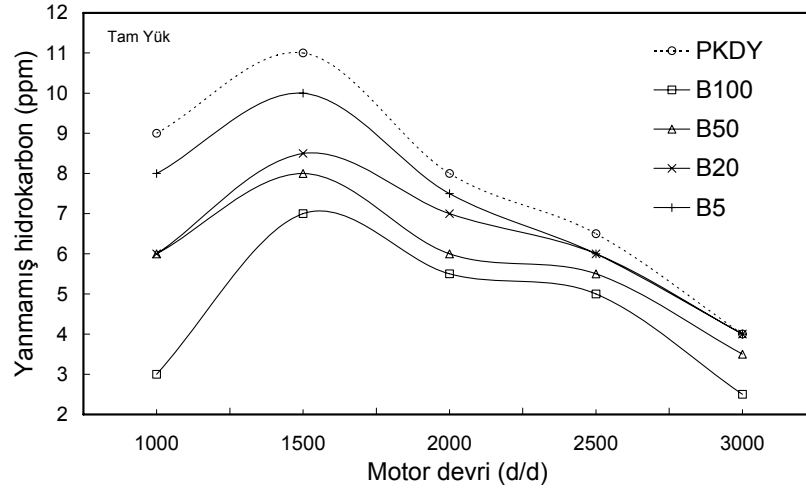
Şekil 5.23: Tam yük ve değişik devir ile azot oksitlerin (NO<sub>x</sub>) değişimi



Motor devri ve yükü değiştikçe NO<sub>x</sub> emisyonunda farklı bir yapı ortaya çıkmıştır. Biyodizel kullanımı ile HC ve CO emisyonunun oluşumunda PKDY'a oranla her devirde azalma olurken, NO<sub>x</sub> emisyonunun oluşumu daha kompleks bir yapı sergilemiştir. Ortalama olarak, B100, B50, B20 ve B5 kullanımıyla ölçülen NO<sub>x</sub> emisyonunda PKDY'a göre sırasıyla %14,72, %13,20, %8,87 ve %3,83 artış gözlemlenmiştir. Dizel motorlarda karışım oluşumu heterojen olduğundan, stokiyometrik karışım oluşumuna yakın bölgelerde NO<sub>x</sub> emisyonu maksimum seviyeye ulaşmaktadır [2]. Biyodizelin özgül yakıt tüketiminin PKDY'a göre daha fazla olması ve içeriğindeki oksijenin yakıtça zengin bölgelerde gerekli oksitlenmeyi sağlaması, yanma bölgelerinin sayısını artırmıştır. Böylece, yüksek ortam sıcaklığının elde edildiği bölge sayısı artmış ve daha yüksek azot oksit oluşumu meydana gelmiştir. Biyodizel ve PKDY'ın püskürtme başlangıçlarının diğer devirlere göre birbirine daha benzer olduğu 2000 ve 2500 devirlerde, biyodizel kullanımı ile NO<sub>x</sub> oluşumu daha yüksek seviyeye çıkmıştır. Yukarıda da ifade edildiği gibi, B100'ün püskürtme başlangıcı PKDY'a göre 1000, 1500 ve 3000 devrilerinde sırasıyla 1,12°, 1,21° ve 2,14° KA daha erken olmuştur. Püskürtme başlangıcının öne alınması NO<sub>x</sub> kontrol yöntemlerinden birisidir [108, 109]. Bu yüzden bu devirlerde, püskürtme başlangıcının daha erken olması ile B100'ün NO<sub>x</sub> emisyonu PKDY'a göre daha düşük veya aynı olmuştur. Ayrıca, PKDY kullanılan 3000 d/d'lık tam yük testi stokiyometrik orana en yakın koşulda geręekleřmiřtir. Bu durum, ısıl NO<sub>x</sub> oluşumunu maksimum seviyeye çıkarmıştır.

#### **5.1.3.4. HC emisyonlarının karşılaştırılması**

Yanma ürünleri arasında yanmamış HC'lerin bulunmasının nedeni, yakıtın tutuşma sıcaklığına gelmemesi veya ortamda oksijenin yetersiz olmasından dolayı yakıtın okside olamaması veya yarı oksitlenmesidir [54]. Şekil 5.24'de tam yük ve değişik devirlerde yanmamış HC emisyonunun değişimi gösterilmektedir. Tam yük Şartlarında, tüm devirlerde biyodizel ve karışımlarının kullanılmasıyla elde edilen yanmamış HC emisyonu PKDY'a göre daha düşük seviyededir. Ortalama olarak, B100, B50, B20 ve B5 kullanımı ile HC emisyonunda PKDY'a kıyasla sırasıyla %40,26, %24,68, %18,18 ve %7,79 azalma olmuştur. Oranlardan anlaşıldığı üzere, yanmamış HC emisyonu karışımdaki biyodizel yüzdesi arttıķa azalmıştır.



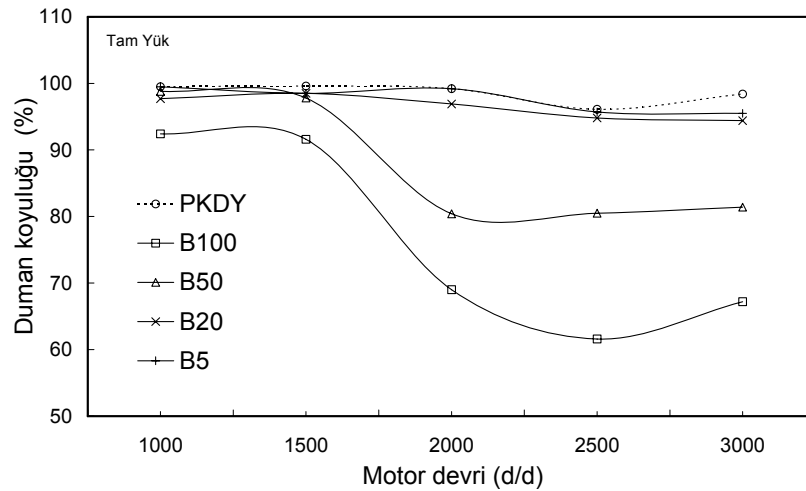
Şekil 5.24: Tam yük ve değişik devirlerde yanmamış HC değişimi

Biyodizel ve karışımlarının kullanımı ile yanmamış HC emisyonundaki azalmanın temel nedeni, biyodizelin içeriğinde bulunan oksijenin zengin yakıt-hava karışım bölgelerinde yeterli oksitlenmeyi sağlamasıdır. Düşük motor hızlarında tüm yakıtların yüksek seviyede yanmamış HC emisyonu üretmesi, bu hızlarda özgül yakıt tüketiminin maksimum seviyede olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, düşük motor hızlarında döngüsel hava hareketlerinin yavaş olması reaksiyon hızının düşmesine neden olmaktadır. Tablo 5.1’de görüldüğü üzere 1500 d/d’da tüm yakıtlar için hava-yakıt oranı düşmüştür. Bu durum, 1500 d/d’da tüm yakıtlar için yanmamış HC emisyonunun maksimum düzeyde oluşmasına neden olmuştur. Düşük devirlerde yanmamış HC emisyonunun artmasındaki diğer bir önemli faktör, testlerde kullanılan dizel motorun mekanik kontrollü yüksek basınç pompasına sahip olmasıdır. Mekanik kontrollü pompalarda, düşük devirlerde yakıt hattı basıncının düşük olması, püskürtülen yakıtın ortalama çapında artışa neden olmaktadır. Yakıt çapının büyümesi hava-yakıt reaksiyonlarının hızını yavaşlatmaktadır. Bu durum, motor devrinin düşük olduğu durumlarda daha yüksek yanmamış HC emisyonlarının oluşmasına neden olabilmektedir. Artan motor hızı ile birlikte tüm yakıtlar için HC emisyonunda bir azalma olmuştur. Bilindiği üzere dizel motorlar hava fazlalığı ile çalışmaktadır. Devir arttıkça; hava hareketleri (türbülans), silindir basıncı ve sıcaklığı da artmaktadır. Bu etkenler yüksek devirlere gidildikçe HC’lerin tam veya kısmi oksitlenmesini artırdığından, yanmamış HC emisyonlarında bir azalma meydana gelmektedir. Biyodizelin setan sayısı PKDY göre daha yüksek olduğundan biyodizel ve karışımlarının kullanımı ile PKDY göre tutuşma gecikmesi süresi kısalmıştır. Bu

durum, egzoz supabının açılma zamanına kadar olan oksidasyon süresinin uzamasına yol açmıştır. Bu yüzden de, biyodizel ve karışımlarının kullanımı ile HC emisyonlarında bir azalma meydana gelmiştir. Dizel motorlarda yanma odasının tipi ve şekli emisyon miktarını önemli derecede etkilemektedir. EDP dizel motorlar, DP dizel motorlara nazaran daha az yanmamış HC emisyonu üretmektedir [54]. Bu çalışmada görülmüştür ki, hem PKDY hem de biyodizel kullanımı sırasında üretilen yanmamış HC emisyonu çok küçük seviyededir. Bu durum, literatürü destekleyecek niteliktedir. Ayrıca test yapılan dizel motorun sıkıştırma oranının yüksek olması (bkz. Tablo 2), egzoz sıcaklıklarının 500–650°C arasında olmasına neden olmuştur. Bu nedenle silindir içerisindeki yanmamış hidrokarbonların egzoz çıkışına doğru oksidasyona uğradığı düşünülebilir.

### 5.1.3.5. Duman koyuluğunun karşılaştırılması

Oksijenin yetersiz olduğu yanma bölgelerinde uzun zincirli HC moleküllerin termal olarak kırılması sonucu partikül ve is (duman koyuluğu) emisyonları oluşmaktadır [5]. Biyodizelin moleküler yapısında oksijen içeriği duman koyuluğunu etkileyen önemli faktördür. Tam yük ve değişik devirlerde duman koyuluğunun değişimi Şekil 5.25’de gösterilmektedir. Testlerde ortalama olarak, B100, B50, B20 ve B5 kullanımı ile duman koyuluğunda PKDY’ye göre sırasıyla %22,52, %10,94, %2,13 ve %0,89 azalma olmuştur.



Şekil 5.25: Tam yük ve değişik devirlerde duman koyuluğunun değişimi

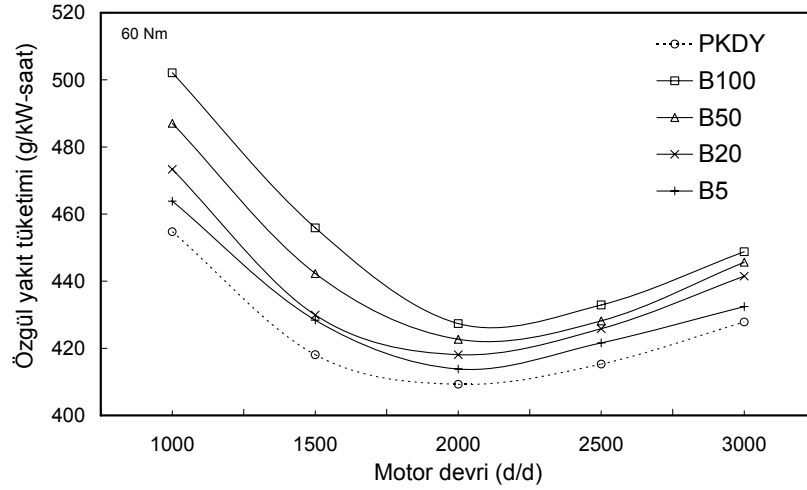
1000 ve 1500 d/d'da tüm yakıtların özgül yakıt tüketiminin fazla olması ve silindir içerisindeki döngüsel hava hareketlerinin yavaş olması duman koyuluğunun yüksek seviyeye çıkmasına neden olmuştur. Motor devri arttıkça PKDY, B5 ve B20'nin duman koyuluğunda hafif bir azalma gözlenirken, B100 ve B50'nin duman koyuluğu önemli oranda azalmıştır. Bu durumun temel nedeni, biyodizelin oksijen içeriğinin yanma bölgelerinde gerekli oksijeni sağlayarak silindir içerisindeki oksitlenme miktarını artırmasıdır. Ayrıca, biyodizelin hemen hemen hiç aromatik bileşik içermemesi partikül ve is emisyonlarında önemli azalmalar sağlamaktadır. PKDY'nin aromatik bileşikler içermesi is ve partikül emisyonlarının oluşmasına neden olmaktadır. Birçok araştırmacı [34–37] PKDY'a eklenen aromatiklerin yüzdesi ile orantılı olarak partikül ve is emisyonlarında artış gözlemlemişlerdir. Diğer bir önemli nokta, motor devri arttıkça maksimum yakıt hattı basıncının artması ile B100 ve B50'nin püskürtülmesi sırasındaki yakıt damlacık çaplarının küçülmesidir. Bu durum, yoğunluğu ve viskozitesi PKDY'a göre yüksek olan biyodizelin, 2000, 2500 ve 3000 devirde hava ile reaksiyon hızını artırmıştır. Bu nedenle, yüksek devirlerde, B100 ve B50 için duman koyuluğunda önemli azalmalar gözlenmektedir. Bir dizel motorun ömrü boyunca 1500 ile 3000 devir arasında çalıştığı düşünülecek olursa, biyodizel kullanımı ile duman koyuluğundaki bu düşüşün ekolojik denge için oldukça önemli olduğu görülmektedir.

## **5.2. 60 Nm Sabit Yükte Motor Test Sonuçlarının Analizi**

### **5.2.1. Performans karakterlerinin karşılaştırılması**

#### **5.2.1.1. Özgül yakıt tüketiminin karşılaştırılması**

Tam yükte olduğu gibi, 60 Nm şartlarında da biyodizelin özgül yakıt tüketiminin tüm devirlerde PKDY'a göre daha yüksek olduğu gözlenmektedir. Şekil 5.26'da 60 Nm sabit yük ve değişik devirlerde özgül yakıt tüketiminin değişimi gösterilmektedir. Tüm yakıtlar ile elde edilen iş aynı olduğu için yakıt tüketimleri az da olsa birbirlerine yaklaşmıştır. 60 Nm sabit yük şartlarında, motor devrinin 1500, 2000, 2500, 3000 d/d olduğu durumlarda, her yakıtın özgül yakıt tüketiminde küçük farklar olduğu görülmüştür.

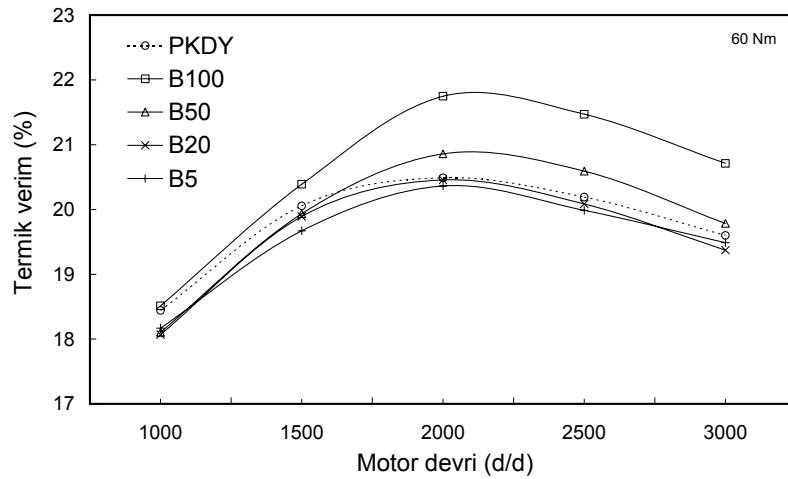


Şekil 5.26: 60 Nm sabit yük ve değişik devirlerde özgül yakıt tüketimi

Tam yük şartlarında olduğu gibi, 60 Nm sabit yük şartlarında da tüm yakıtlar için maksimum yakıt tüketimi 1000 d/d'da ortaya çıkmıştır. Test yakıtları içerisinde B100, 1000 d/d'da 502,09 g/kW-saat değeri ile maksimum özgül yakıt tüketimine sahiptir. Motor gücü, hız ile doğru orantılı olarak arttığı için, motor devrinin 1000 d/d olduğu durumda birim güç başına tüketilen yakıt miktarı daha fazla olmuştur. Birim zamandaki yakıt tüketimi ise artan motor devri ile artmaktadır. Ayrıca, biyodizelin yoğunluğunun ve viskozitesinin PKDY'ya oranla daha yüksek olması püskürtme karakteristiklerini etkilediğinden, özellikle düşük devirlerde özgül yakıt tüketiminde artışa sebep olmaktadır. 60 Nm sabit yük ve devir şartlarında, tüm yakıtlar için özgül yakıt tüketimi 2000 d/d'da en düşük değerine ulaşmıştır. Motor devri arttıkça birim gücün ve yakıt tüketiminin artmasından dolayı 2000 d/d'da minimum özgül yakıt tüketimi elde edilmiştir. 2000 d/d'daki motor testinde, özgül yakıt tüketimi PKDY için 409,27, B5 için 413,82, B20 için 418,12, B50 için 422,69, B100 için 427,36 g/kW-saat olarak ölçülmüştür. Ortalama olarak B100, B50, B20 ve B5'in özgül yakıt tüketimi PKDY'ya kıyasla, sırasıyla %6,67, %4,73, %2,99, %1,64 daha yüksektir. Daha önce de ifade edildiği gibi, biyodizelin ısı değeri PKDY'ya göre daha düşük olduğundan, aynı gücün ve devir sayısının elde edilebilmesi için silindire püskürtülen yakıt miktarının artırılması gerekmektedir. Bu durum, biyodizel kullanımında özgül yakıt tüketiminin artışıdaki temel nedenlerden biridir.

### 5.2.1.2. Termik verimin karşılaştırılması

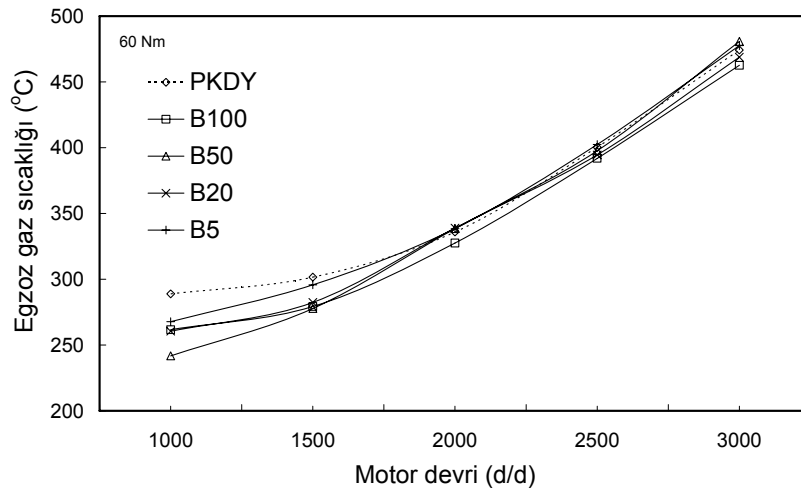
Bölüm 5.1.1.2’de açıklandığı üzere, tam yük şartlarında biyodizel ve karışımlarının kullanılması ile termik verimde azalma olmuştur. Motor testleri, 60 Nm sabit yük ve değişen devir için yapıldığında termik verim yakıt türüne göre değişim göstermiştir. Ortalama olarak B100 ve B50 kullanımı ile termik verimde, PKDY’ya göre %0,81 ve %0,10 artış olurken, B20 ve B5 kullanımıyla %0,18 ve %0,22 azalma olmuştur. Motor yükü azaldıkça yakıtların özgül yakıt tüketimlerinin birbirine yaklaşması ve yakıtın ısıl değerinin termik verimle ters orantılı olması bu durumun temel sebebidir. Ayrıca, biyodizelin oksijen içeriği, PKDY ile aynı motor yükünün elde edildiği yüksek devirli testlerde etkisini daha çok hissettirmiştir. 2000, 2500 ve 3000 d/d’da biyodizel kullanılmasıyla elde edilen maksimum silindir gaz basıncı biraz daha ÜÖN’ya yaklaşmıştır. Bu durum, motorun hareketli parçalarındaki atalet kuvvetlerinde azalmaya neden olduğundan termik verimde bir miktar artış meydana getirmiştir. Şekil 5.27’de test yakıtları için termik verimin motor devri ile değişimi gösterilmektedir. 60 Nm sabit yük şartlarında termik verim %18–22 arasında seyretmiştir. 60 Nm sabit yükte elde edilen termik verim tam yük şartlarına göre azalmıştır. Motor yükü azaldıkça birim güç başına püskürtülen yakıt miktarının artması termik verimde azalmaya neden olmuştur. 60 Nm sabit yükte de maksimum termik verim özgül yakıt tüketiminin minimum olduğu 2000 d/d’da elde edilmiştir. 2000 d/d’daki termik verim PKDY, B5, B20, B50 ve B100 için sırasıyla %20,49, %20,36, %20,46, %20,86 ve %21,75 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.27: 60 Nm sabit yük ve değişik devirlerde termik verimin değişimi

### 5.2.1.3. Egzoz gazı sıcaklıklarının karşılaştırılması

Tam yük şartlarına kıyasla 60 Nm sabit yük şartlarında egzoz sıcaklığı önemli derecede azalmıştır. 60 Nm sabit yük şartlarında tüm yakıtların egzoz sıcaklıkları özellikle 2000, 2500 ve 3000 d/d'da birbirlerine çok yakın olduğu tespit edilmiştir. Bu devirlerde biyodizel ve karışımlarının silindir gaz basınçlarının PKDY'ya göre biraz daha yüksek olması silindir içerisindeki sıcaklığın yükselmesine neden olduğu düşünülmüştür. 60 Nm sabit yük şartlarında, maksimum egzoz sıcaklığı 3000 d/d'da, PKDY için 474,2°C, B5 için 477,5°C, B20 için 468,8°C, B50 için 480,8°C, B100 için 462,6°C olarak ölçülmüştür. 3000 d/d'da yakıtların sıcaklıkları arasındaki fark 10°C'nin altındadır. Düşük devirlerde silindir içerisindeki reaksiyonların yavaş olmasından dolayı özgül yakıt tüketimindeki artış reaksiyonun süresini biraz daha uzatmaktadır. Bu yüzden, biyodizel ve karışımlarının kullanılması ile egzoz sıcaklıklarında azalma olabilmektedir. Şekil 5.28'de 60 Nm sabit yük ve değişik devirlerde egzoz gaz sıcaklıklarının değişimi gösterilmektedir. 60 Nm sabit yükte 1000 d/d'da yakıtların sıcaklıkları arasındaki fark 50°C'nin altındadır. 1000 ve 1500 d/d'da minimum egzoz sıcaklığı B50 için 241,8°C ve 277,8°C olarak ölçülmüştür. Şekil 5.29 ve 5.30'da görüldüğü gibi B50 kontrollü yanma periyodunu diğer yakıtlara göre daha erken tamamlamıştır. Bu durum B50'nin 1000 ve 1500 d/d'daki egzoz sıcaklıklarının düşük çıkmasına neden olmuştur.



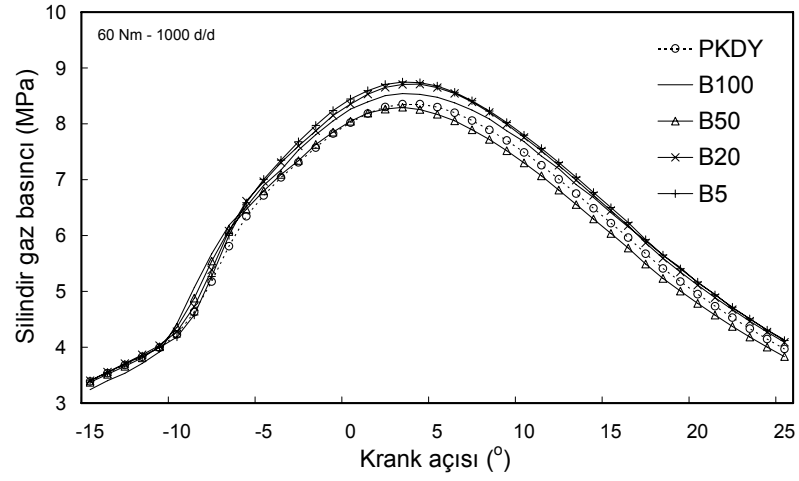
Şekil 5.28: 60 Nm sabit yük ve değişik devirlerde egzoz gaz sıcaklıklarının değişimi

## 5.2.2. Yanma ve püskürtme karakterlerinin karşılaştırılması

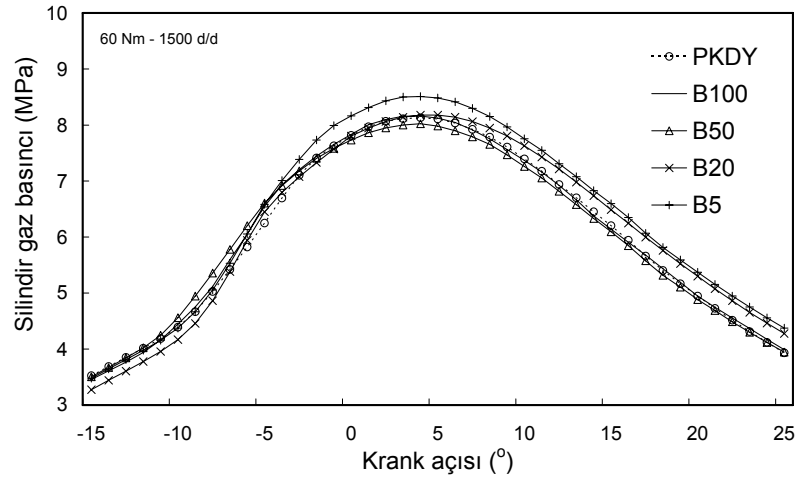
### 5.2.2.1. Silindir gaz basınçlarının karşılaştırılması

Genelde, 60 Nm sabit yük ve değişken devir şartlarında biyodizel ve karışımlarının kullanımı ile maksimum silindir gaz basıncı elde edilmiştir. Şekil 5.29, 5.30, 5.31, 5.32, 5.33'de 60 Nm sabit yük ve değişik devirlerde silindir gaz basıncının KA'ya göre değişimi gösterilmektedir. 1000 ve 1500 d/d'da B5, 2000 ve 2500 d/d'da B100, 3000 d/d'da B50'nin silindir gaz basıncı en yüksek seviyeye çıkmıştır. Biyodizel ve karışımlarının kullanımı ile PKDY'a göre daha geniş maksimum silindir basınç tepesi meydana gelmiştir. Bu durumun biyodizelin kaynama noktasının PKDY'a göre daha yüksek ve buharlaşma eğrisinin daha yatay seyretmesinden kaynaklandığı düşünülmüştür. Tüm yakıtlar için motor devri arttıkça maksimum silindir gaz basıncının KA cinsinden uzadığı görülmüştür. 1000, 1500, 2000 d/d'da maksimum silindir gaz basıncı KA cinsinden çok kısa bir süre kalırken, 2500 ve 3000 d/d'da yaklaşık 5° KA maksimum silindir gaz basıncı sürmektedir. Devir arttıkça püskürtme başlangıcının daha erken, yakıt hattı basıncının daha yüksek ve birim zamanda püskürtülen yakıt miktarının fazla olması bu sonuca neden olmaktadır. 60 Nm sabit yük şartlarında yakıtlar için silindir gaz basıncı motor devrinin artması ile artmıştır. Bu durum, motor devri arttıkça silindir gaz basıncı altında kalan alanın büyümesine neden olmaktadır. 60 Nm sabit yük şartlarında, tüm motor devirleri için maksimum silindir gaz basıncı 2,75° ile 6° KA arasında gerçekleşmiştir. 60 Nm sabit yük şartlarında yakıtların maksimum silindir gaz basınçları arasındaki fark tam yük şartlarına göre küçülmüştür. Genelde, yakıtların KA cinsinden maksimum silindir gaz basınç noktaları birbirine çok benzemektedir. Tüm testlerde biyodizel ve karışımlarının kullanımı ile silindir gaz basıncının artışı daha erken başlamış, kontrollü yanma safhası PKDY'a benzer genişleme göstermiştir. Özellikle 2000 ve 2500 d/d'da biyodizelin silindir gaz basıncının 3° ve 1° KA daha erken yükselmeye başladığı gözlemlenmiştir.

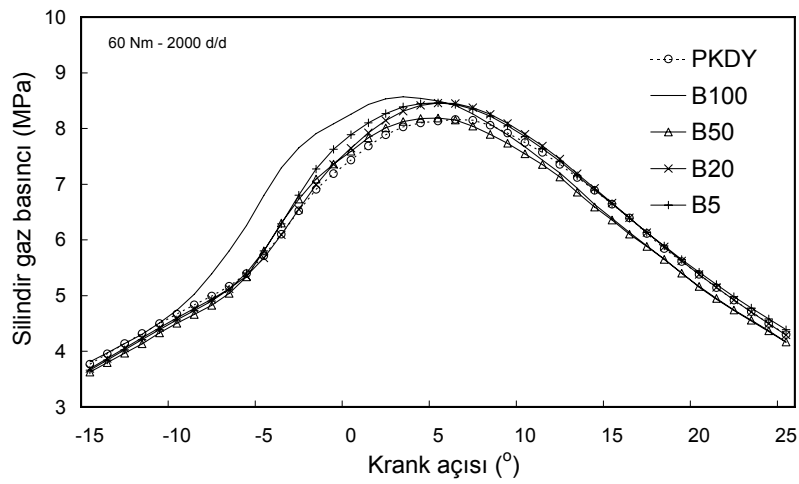




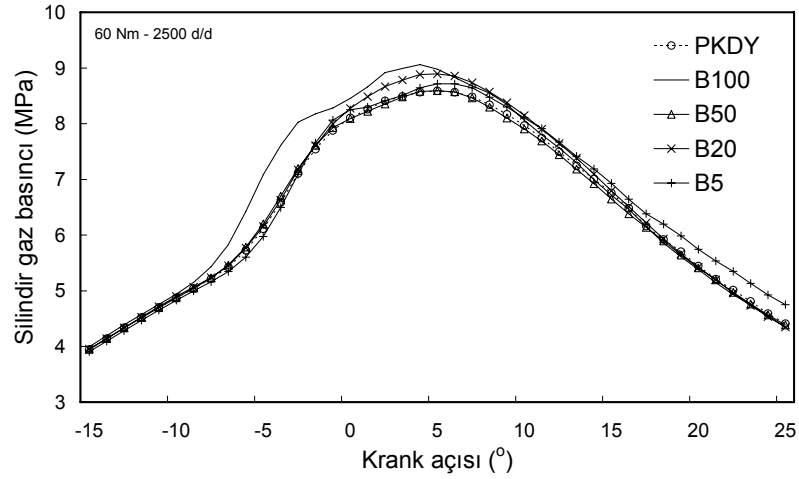
Şekil 5.29: 60 Nm sabit yük ve 1000 d/d’da silindir gaz basıncının KA’ya göre değişimi



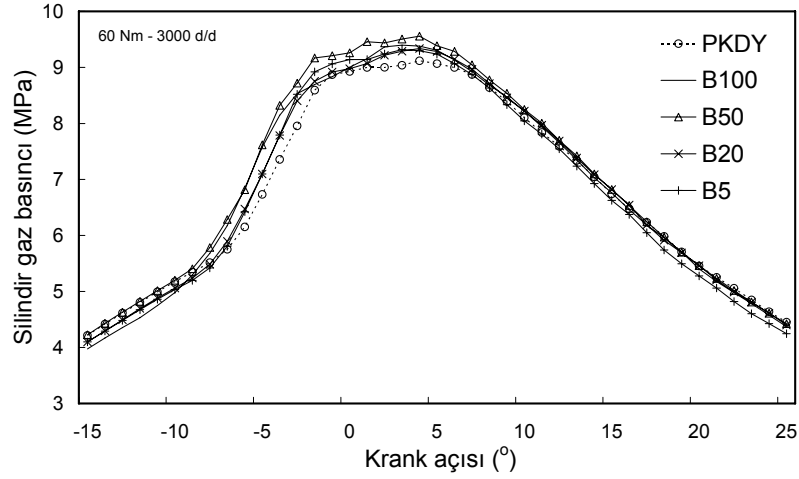
Şekil 5.30: 60 Nm sabit yük ve 1500 d/d’da silindir gaz basıncının KA’ya göre değişimi



Şekil 5.31: 60 Nm sabit yük ve 2000 d/d’da silindir gaz basıncının KA’ya göre değişimi



Şekil 5.32: 60 Nm sabit yük ve 2500 d/d'da silindir gaz basıncının KA'ya göre değişimi

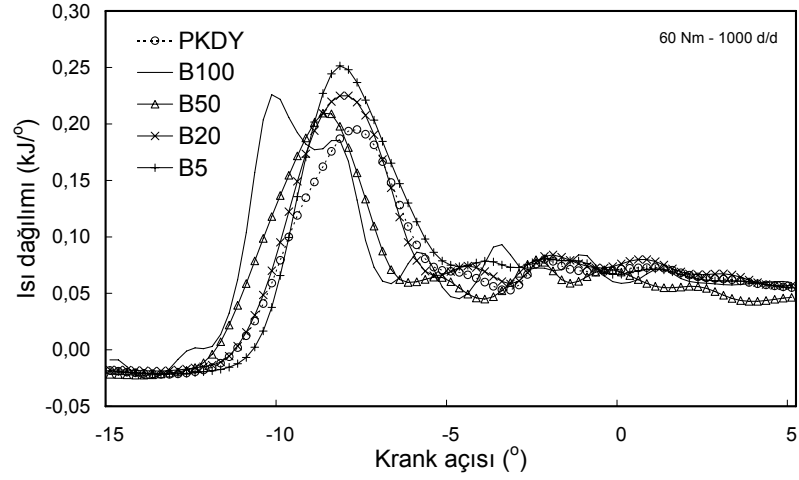


Şekil 5.33: 60 Nm sabit yük ve 3000 d/d'da silindir gaz basıncının KA'ya göre değişimi

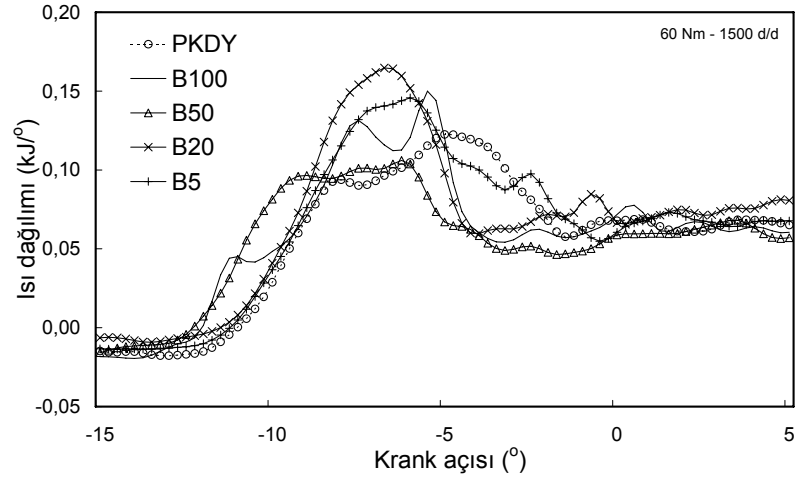
#### 5.2.2.2. Isı dağılımlarının karşılaştırılması

60 Nm sabit yük ve değişken devirlerde ısı dağılımının KA'ya göre değişimi Şekil 5.34, 5.35, 5.36, 5.37, 5.38'de gösterilmektedir. Tüm devirlerde B100 ve B50'nin ısı dağılımı başlangıcı PKDY'ya göre daha erken başlamıştır. Bu duruma, B100 ve B50'nin püskürtme başlangıçlarının B20, B5 ve PKDY'ya göre daha erken başlaması neden olmuştur. Ayrıca, tüm devirlerde B100 ve B50'nin ısı dağılımı tepe noktası en yüksek seviyeye çıkmıştır. Bu duruma, B100 ve B50'nin özgül yakıt tüketiminin tüm devirlerde B5, B20 ve PKDY'ya göre daha fazla olması neden olmuştur. Tam yükte olduğu gibi, 60 Nm sabit yükte de tüm yakıtların ani ısı dağılımları (kontROLSÜZ yanma) altında kalan alanlar kesişmektedir. KA cinsinden tamamen farklı bir

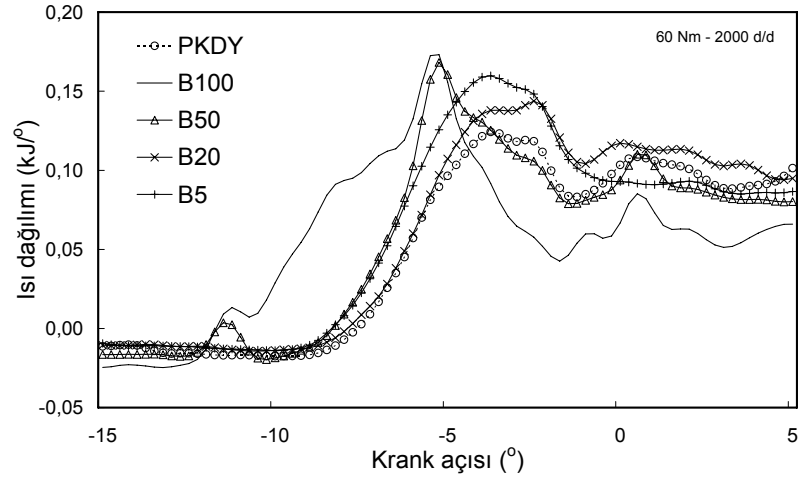
noktada ani ısı dağılımı alanı görülmemiştir. Daha önce de ifade edildiği gibi bu duruma, ön yanma odalı dizel motorun karışım oluşturma prosesinin neden olduğu düşünülmüştür.



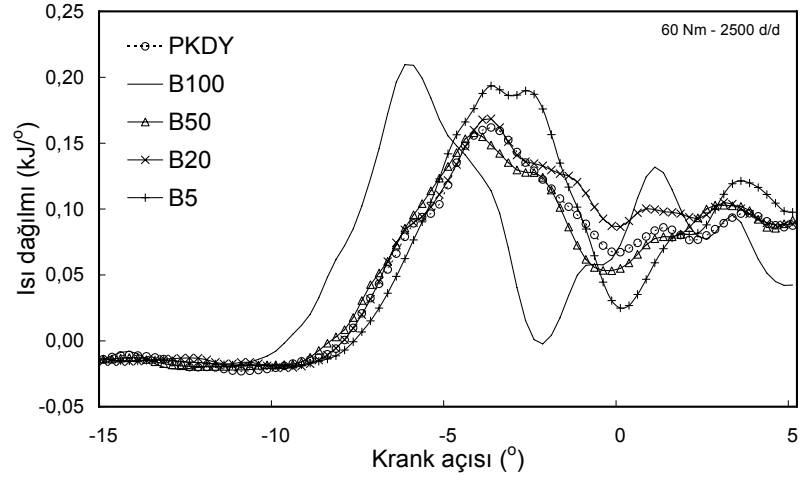
Şekil 5.34: 60 Nm sabit yük ve 1000 d/d'da ısı dağılımının KA'ya göre değişimi



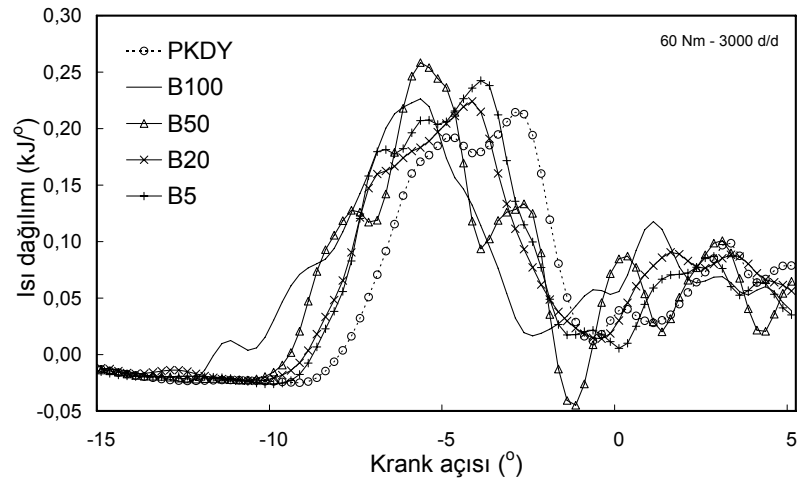
Şekil 5.35: 60 Nm sabit yük ve 1500 d/d'da ısı dağılımının KA'ya göre değişimi



Şekil 5.36: 60 Nm sabit yük ve 2000 d/d'da ısı dağılımının KA'ya göre değişimi



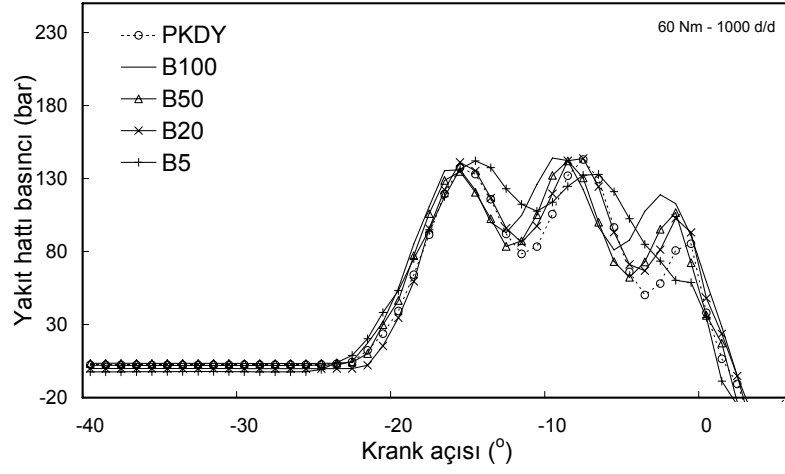
Şekil 5.37: 60 Nm sabit yük ve 2500 d/d'da ısı dağılımının KA'ya göre değişimi



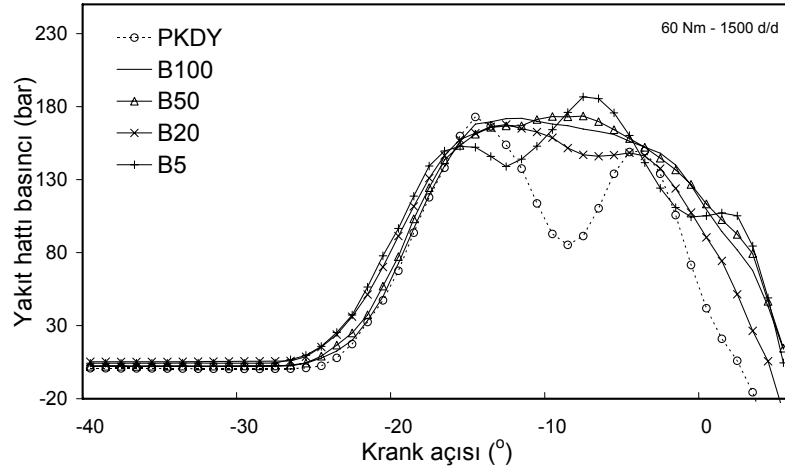
Şekil 5.38: 60 Nm sabit yük ve 3000 d/d'da ısı dağılımının KA'ya göre değişimi

### 5.2.2.3. Yakıt hattı basınçlarının ve tutuşma gecikmesinin karşılaştırılması

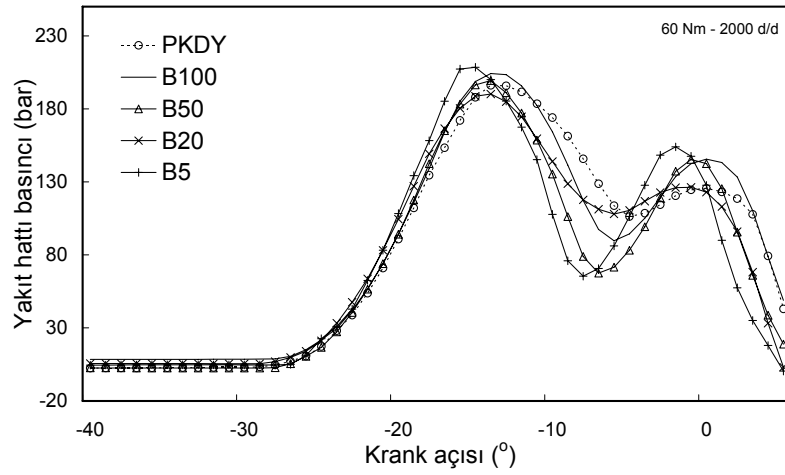
Şekil 5.39, 5.40, 5.41, 5.42, 5.43’de 60 Nm sabit yük ve değişik devirlerde yakıt hattı basıncının KA’ya göre değişimi gösterilmektedir. Yakıtların aynı motor hızlarındaki maksimum yakıt hattı basınçları ve püskürtme karakteristikleri genelde birbirine benzer çıkmıştır. Aynı yük şartlarında tüm yakıtların silindir içerisindeki ortam basınçlarının birbirine yakın olması, benzer karışım basınçları oluşturduğundan, yakıt hattındaki basınç dalgalanmaları da birbirine benzemektedir. Testlerde kullanılan dizel motorun yakıt pompasının mekanik kontrollü olması nedeniyle yakıt hattı basıncının motor devrine bağlı olarak sağlanması da bu benzerlikte önemli bir etkidir. B5’in maksimum silindir gaz basıncı göstermesi, yakıt hattı basınç grafiklerinde B5’in çok az da olsa farklı bir görüntü sergilemesinde etkili olmuştur. 60 Nm sabit yük testlerinde, biyodizel ve karışımlarının kullanılması ile püskürtme başlangıcı PKDY’ya göre daha erken olmuştur. B100 için püskürtme başlangıcı PKDY’ya göre 1000, 1500, 2000, 2500, 3000 d/d’da sırasıyla 0,74°, 1,07°, 0,95°, 0,87°, 1,69° KA daha erken olmuştur. Tüm devirlerde B5 ve B20’nin püskürtme başlangıcı PKDY’ya çok yakın çıkmıştır. 60 Nm sabit yük şartlarında püskürtme başlangıcı tam yüke göre 1-2° KA ÜÖN’ya yaklaşmıştır. Bunun nedeni, tam yük şartlarına kıyasla 60 Nm sabit yük şartlarında birim zamanda püskürtülen yakıt miktarının daha az olmasıdır. Ayrıca, püskürtme süresi KA cinsinden tüm yakıtlar için devir arttıkça artmıştır. Tablo 5.7, 5.8, 5.9, 5.10 ve 5.11’de püskürtme başlangıcının motor devrine göre değişimi KA cinsinden verilmektedir. Daha önce de ifade edildiği gibi, biyodizel kullanımı ile püskürtme başlangıcının PKDY’ya göre daha erken olmasındaki etken, biyodizelin PKDY’ya göre viskozitesinin ve yoğunluğunun daha yüksek, sıkıştırılabilirliğinin ise daha az olmasıdır.



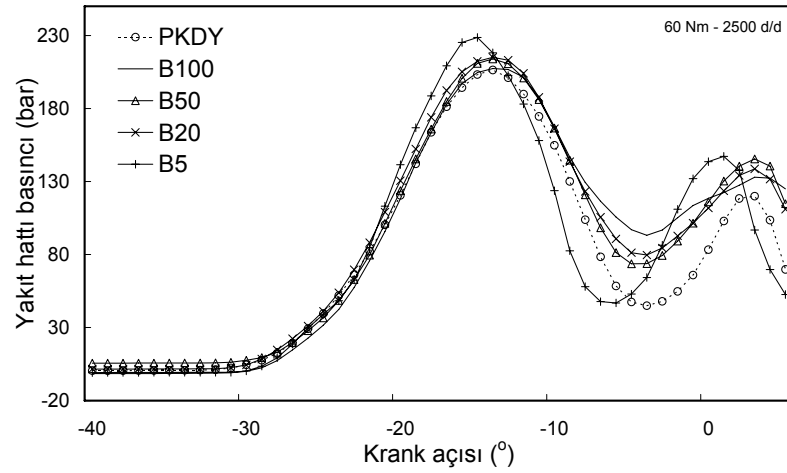
Şekil 5.39: 60 Nm sabit yük ve 1000 d/d'da yakıt hattı basıncının KA'ya göre değişimi



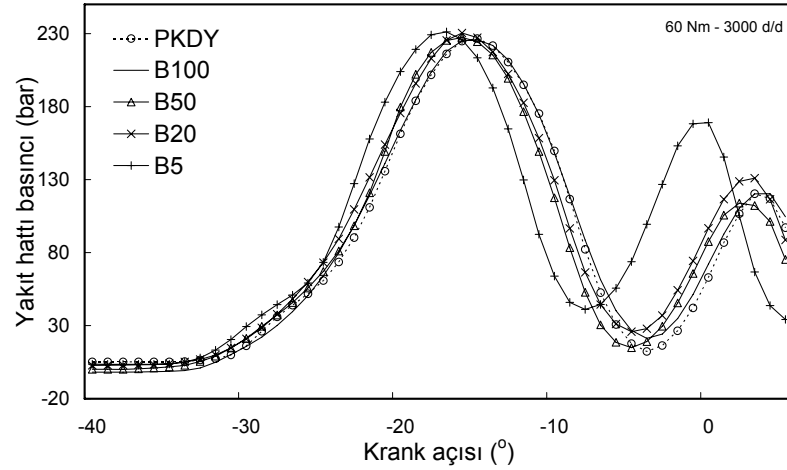
Şekil 5.40: 60 Nm sabit yük ve 1500 d/d'da yakıt hattı basıncının KA'ya göre değişimi



Şekil 5.41: 60 Nm sabit yük ve 2000 d/d'da yakıt hattı basıncının KA'ya göre değişimi



Şekil 5.42: 60 Nm sabit yük ve 2500 d/d'da yakıt hattı basıncının KA'ya göre değişimi



Şekil 5.43: 60 Nm sabit yük ve 3000 d/d'da yakıt hattı basıncının KA'ya göre değişimi

Tablo 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11'de 60 Nm sabit yük ve değişik devirlerde püskürtme ve ısı dağılımı başlangıçları, tutuşma gecikmesi süresi KA cinsinden verilmektedir. Tam yükte olduğu gibi tüm yakıtların tutuşma gecikme süresi motor devri arttıkça KA cinsinden artmaktadır. Ayrıca, biyodizel ve karışımlarının tutuşma gecikmesi, tam yükte olduğu gibi 60 Nm sabit yükte de PKDY'ya göre KA cinsinden daha kısadır. Biyodizel ile PKDY arasında maksimum fark 2500 ve 3000 d/d'da,  $1,63^\circ$  ve  $1,56^\circ$  KA olarak görülmüştür. 2500 ve 3000 d/d'daki B100 ile PKDY arasındaki fark dışında, 60 Nm sabit yük şartlarında, yakıtların tutuşma gecikmesi süreleri arasındaki fark genelde  $0,8^\circ$  KA'nın altındadır. Deney motorunda maksimum döndürme momentinin elde edildiği 2000 d/d'da tüm yakıtların tutuşma gecikmesi süresi birbirine benzemektedir. 2000 d/d'da B100, B50, B20 ve B5'in tutuşma gecikmesi

PKDY'a göre sırasıyla 0,55°, 0,36°, 0,21° ve 0,34° KA daha kısadır. Biyodizelin uçuculuğunun PKDY'a göre düşük olmasına rağmen, biyodizelin setan sayısının yüksek olması ve yapısında oksijen bulundurması, benzer reaksiyon hızları göstermesine yardımcı olduğu düşünülmüştür. 60 Nm sabit yükte motor devri 2000 d/d'dan 3000 d/d'ya yükselirken tutuşma gecikmesi süresi giderek kısalmıştır.

Tablo 5.7: 60 Nm sabit yük ve 1000 d/d'da tutuşma gecikmesi

1000 d/d				
Yakıt	PB(°)	IDB (°)	TG (°)	TGS (sn)
PKDY	16,54	12,50	4,04	0,000673
B100	17,28	14,00	3,28	0,000547
B50	16,93	13,50	3,43	0,000572
B20	16,66	13,00	3,66	0,000610
B5	16,45	12,50	3,95	0,000658

PB -Püskürtme Başlangıcı, IDB -Isı Dağılımı Başlangıcı,  
TG -Tutuşma Gecikmesi, TGS -Tutuşma Gecikmesi Süresi

Tablo 5.8: 60 Nm sabit yük ve 1500 d/d'da tutuşma gecikmesi

1500 d/d				
Yakıt	PB(°)	IDB (°)	TG (°)	TGS (sn)
PKDY	17,41	12,00	5,41	0,000601
B100	18,48	13,75	4,73	0,000526
B50	18,08	13,25	4,83	0,000537
B20	17,75	12,75	5,00	0,000556
B5	17,50	12,25	5,25	0,000583

Tablo 5.9: 60 Nm sabit yük ve 2000 d/d'da tutuşma gecikmesi

2000 d/d				
Yakıt	PB(°)	IDB (°)	TG (°)	TGS (sn)
PKDY	18,22	9,25	8,97	0,000748
B100	19,17	10,75	8,42	0,000702
B50	18,86	10,25	8,61	0,000718
B20	18,51	9,75	8,76	0,000730
B5	18,38	9,75	8,63	0,000719

Tablo 5.10: 60 Nm sabit yük ve 2500 d/d'da tutuşma gecikmesi

2500 d/d				
Yakıt	PB(°)	IDB (°)	TG (°)	TGS (sn)
PKDY	19,55	8,75	10,80	0,000720
B100	20,42	11,25	9,17	0,000611
B50	20,02	9,50	10,52	0,000701
B20	19,75	9,25	10,50	0,000700
B5	19,58	9,00	10,58	0,000705



Tablo 5.11: 60 Nm sabit yük ve 3000 d/d'da tutuşma gecikmesi

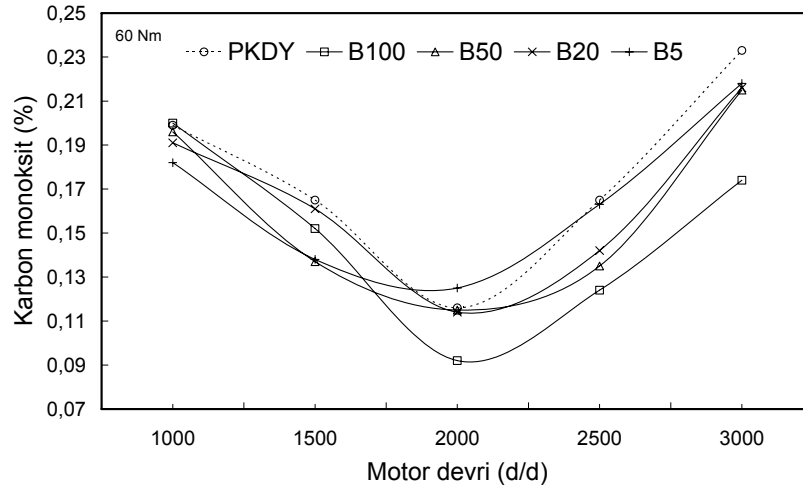
3000 d/d				
Yakıt	PB(°)	IDB (°)	TG (°)	TGS (sn)
PKDY	21,22	9,25	11,97	0,000665
B100	22,91	12,50	10,41	0,000578
B50	22,07	10,75	11,32	0,000629
B20	21,65	10,25	11,40	0,000633
B5	21,50	10,00	11,50	0,000639

### 5.2.3. Egzoz emisyon karakterlerinin karşılaştırılması

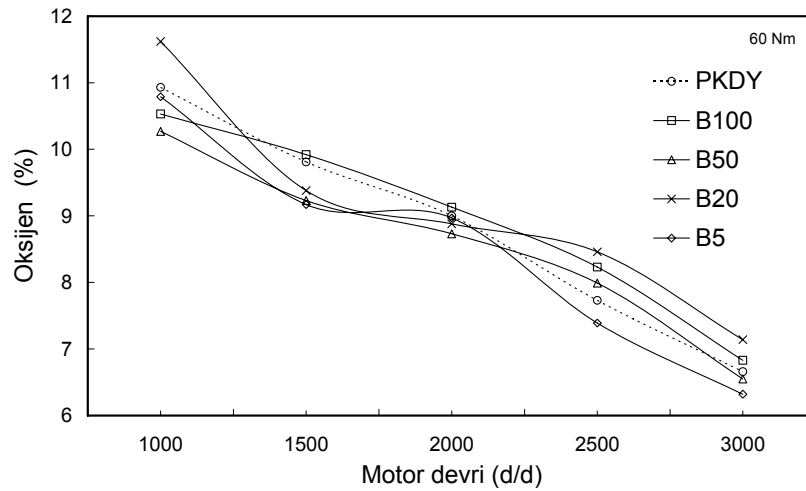
#### 5.2.3.1. CO emisyonlarının karşılaştırılması

60 Nm sabit yük şartlarındaki karbon monoksit eğrisinde, tam yükte olduğu gibi düzenli bir görüntü oluşmamıştır. Şekil 5.44'de 60 Nm sabit yük ve değişik devirlerde karbon monoksit yüzdesinin değişimi gösterilmektedir. Ortalama olarak, B100, B50, B20 ve B5 kullanımıyla ölçülen CO emisyonunda PKDY'ya göre sırasıyla %15,49, %9,11, %6,15 ve %5,92 azalma gözlenmiştir. B100 hariç, tüm yakıtların CO emisyonu 3000 d/d'da maksimum düzeye ulaşmıştır. Daha önce de ifade edildiği üzere, yüksek devirlerde volumetrik verim azalırken, silindir içerisindeki artık gaz miktarı da artmaktadır. Bu durum, tam yanma reaksiyonlarının azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca, yakıtın içeriğinde bulunan hidrojen atomu karbon atomuna göre çok daha hızlı oksijen ile reaksiyona girmektedir [2]. Bu yüzden, yüksek devirlerde silindir içerisine alınan hava, ilk önce hidrojen atomu ile reaksiyon oluşturmaktadır. Yüksek sıcaklıkta, geri kalan hava ile karbon atomu tam reaksiyona girememekte, havanın yetersiz kaldığı bölgelerde karbon parçacıkları ve CO emisyonu oluşmaktadır. B100 ile 3000 d/d'da CO emisyonunun asgari düzeyde elde edilmesinin nedeni, biyodizelin içeriğindeki oksijenin havanın yetersiz olduğu bölgelerde yakıttaki karbon bileşikleriyle reaksiyona girmesidir. 2000 d/d'da tüm yakıtlar için minimum CO emisyonu gözlenmiştir. Her yakıt kendi içerisinde 2000 d/d'da en yüksek hava-yakıt oranına sahip olduğundan CO emisyonunda azalma olmuştur. Tablo 5.11'de 60 Nm sabit yükte motor devrine göre hava-yakıt oranlarının değişimi verilmektedir. 60 Nm sabit yük şartlarında her yakıt için 1500 d/d'da üretilen CO emisyonu 1000 d/d'ya göre azalma göstermiştir. Bu durum, 1000

d/d'da her yakıt için özgül yakıt tüketiminin 1500 d/d'ya göre daha fazla olmasından ve 1500 d/d'da döngüsel hava hareketlerinin biraz daha artmasından kaynaklanmaktadır. 1000 d/d'da B5'in en yüksek hava-yakıt oranına sahip olması, bu devirde B5'in minimum CO emisyonu üretmesine neden olmuştur. Tam yük şartlarına göre 60 Nm sabit yükte her yakıt için CO oluşumu oldukça azalmıştır. 60 Nm sabit yük şartlarında, hava-yakıt oranında küçük değişikliklerin yakıtların CO emisyonunda farklılaşmaya yol açtığı gözlemlenmiştir. Hava-yakıt oranındaki değişim egzozdan çıkan oksijen yüzdesine de yansımıştır. Şekil 5.45'de 60 Nm sabit yük ve değişik devirlerde egzoz emisyonları içerisindeki oksijen yüzdesinin değişimi gösterilmektedir.



Şekil 5.44: 60 Nm sabit yük ve değişik devirlerde CO emisyonunun değişimi



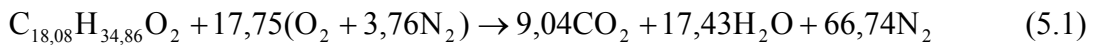
Şekil 5.45: 60 Nm sabit yük ve değişik devirlerde oksijen (O<sub>2</sub>) yüzdesinin değişimi

Tablo 5.12: 60 Nm sabit yükte motor devrine göre hava-yakıt oranları

Yakıt	1000	1500	2000	2500	3000
PKDY	18,59	17,58	19,6	18,13	16,46
B100	17,26	16,05	18,59	17,55	15,64
B50	17,21	16,47	18,41	17,51	15,55
B20	18,99	17,58	19,09	17,92	16,24
B5	19,29	17,31	19,47	18,28	16,43

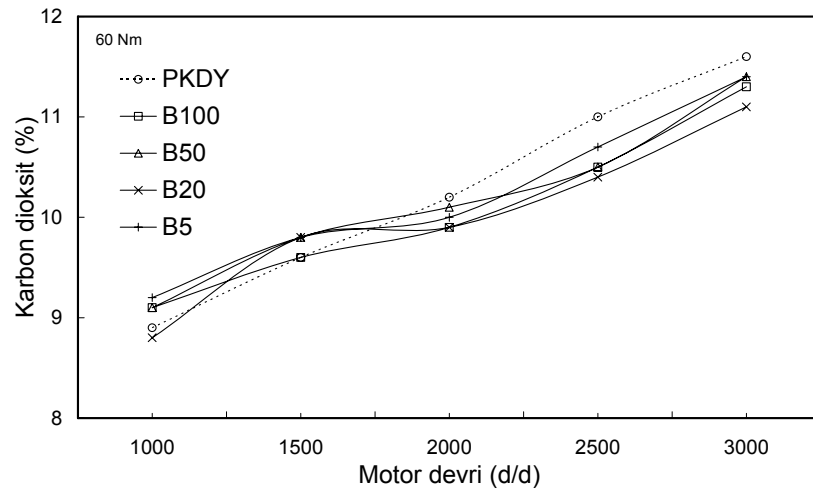
### 5.2.3.2.CO<sub>2</sub> emisyonlarının karşılaştırılması

Peterson ve Hustrulid [107], Peterson ve Recee [110], genelde ham petrolün ağırlık olarak %86'sının karbon, %14'ünün hidrojen olduğunu, kanola yağı kökenli biyodizelin ise %78'inin karbon, %12'sinin hidrojen ve %10'nun oksijenden oluştuğunu ifade etmişlerdir. Bu oranlara sahip ham petrol (C<sub>16</sub>H<sub>34</sub>) ve kanola yağı kökenli biyodizel (C<sub>22</sub>H<sub>43</sub>O<sub>2</sub>) için tam yanma denklemini kurduklarında her bir kg ham petrol için 3,11 kg CO<sub>2</sub>, her bir kg kanola yağı kökenli biyodizel için 2,86 kg CO<sub>2</sub>'in yanma ürünü olarak çıktığını hesaplamışlardır. Bu çalışma için tam yanma denklemleri kurulacak olursa, her bir kg biyodizel (C<sub>18,08</sub>H<sub>34,86</sub>O<sub>2</sub>) için yanma ürünü olarak 1,4 kg CO<sub>2</sub>, her bir kg PKDY (C<sub>14,16</sub>H<sub>25,21</sub>) için 1,6 kg CO<sub>2</sub> çıkmaktadır. Biyodizel ve PKDY için kurulan tam yanma reaksiyonları denklem 5.1 ve 5.2'de gösterilmektedir.



Aynı yük, devir ve hava-yakıt oranı teorik olarak incelendiğinde, her bir kg yakıt için PKDY'nin biyodizele göre 1,14 kat daha fazla CO<sub>2</sub> emisyonu üretmesi gerekmektedir. Pratik uygulamada ise biyodizelin özgül yakıt tüketiminin PKDY'a göre daha fazla olması ve hava-yakıt oranının motorun o anki çalışma şartlarına göre değişmesiyle tam yanma reaksiyonlarının gerçekleşmemesi sonucu CO<sub>2</sub> oluşumunda daha farklı bir yapı ortaya çıkarabilmektedir. Şekil 5.46'da 60 Nm sabit yük ve değişik devirlerde karbondioksit yüzdesinin değişimi gösterilmektedir. 60 Nm sabit yük

şartlarında, ortalama olarak, B100, B50, B20 ve B5 kullanımıyla PKDY'ya kıyasla CO<sub>2</sub> emisyonunda sırasıyla %1,75, %0,78, %2,53 ve %0,39 azalma görülmüştür. 1000 d/d'da biyodizel kullanımı ile PKDY'ya kıyasla %2,2 artış görülürken, 2000, 2500 ve 3000 d/d'da sırasıyla %3, %4,8 ve %2,7 azalma olmuştur. 1500 d/d'da her iki yakıt da aynı konsantrasyonda CO<sub>2</sub> emisyonu üretmiştir. Tam yüke göre, 60 Nm sabit yükte CO<sub>2</sub> emisyonu tüm yakıtlar için azalma göstermiştir. Bu durum, 60 Nm sabit yük şartlarında birim zamanda püskürtülen yakıt miktarının tam yük şartlarına göre daha az olmasından kaynaklanmaktadır. Tam yükte CO<sub>2</sub> konsantrasyonu %11,4–13,6 arasında seyrederken, 60 Nm sabit yükte %8,8–11,6 arasında değişim göstermiştir. 60 Nm sabit yük şartlarında tüm yakıtlar birbirine benzer eğilimlerde CO<sub>2</sub> emisyonu üretmişlerdir. Her yakıt motor devrinin artması ile doğru orantılı olarak artan miktarda CO<sub>2</sub> emisyonu üretmiştir.

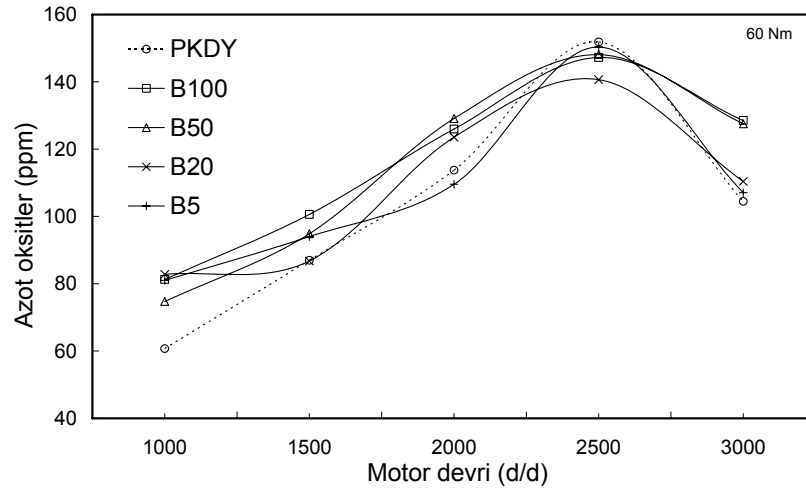


Şekil 5.46: 60 Nm sabit yük ve değişik devirlerde CO<sub>2</sub> emisyonunun değişimi

### 5.2.3.3. NO<sub>x</sub> emisyonlarının karşılaştırılması

Biyodizel ve karışımlarının PKDY ile aynı yük ve devirde test edilmesi yakıtların ekolojikliğini göstermesi açısından önemlidir. Şekil 5.47'de 60 Nm sabit yük ve değişik devirlerde düzeltme faktörü ile çarpılarak elde edilen azot oksitlerin değişimi gösterilmektedir. NO<sub>x</sub> emisyonu tam yüke göre tüm yakıtlar için belirli eğilimde olmuştur. Ayrıca, tam yüke göre 60 Nm sabit yük şartlarında ortamda daha fazla hava bulunması NO<sub>x</sub> emisyon oluşumunu biraz daha artırmıştır. Tablo 5.12'deki hava-yakıt oranları incelendiğinde, tüm devirlerde stokiyometrik şartlara en yakın

gerçekleşen testler B50 ve B100 testleridir. Bu durum, B100 ve B50'nin NO<sub>x</sub> emisyonunun yüksek çıkmasına neden olmuştur. Diğer taraftan, B100 ve B50 kullanımıyla püskürtme başlangıcının PKDY'ya göre erken olması NO<sub>x</sub> emisyonunu azaltıcı yönde tesir etmektedir. Bu iki zıt faktörün sonucu olarak, 60 Nm sabit yük şartlarında, B100, B50, B20 ve B5 kullanımıyla ölçülen NO<sub>x</sub> emisyonu PKDY'ya kıyasla sırasıyla %12,72 %10,92, %5,08 ve %4,67 artmıştır. Bu sonuç, 60 Nm sabit yük ve devir şartlarında, biyodizelin yüzdesi ile ilişkili olarak NO<sub>x</sub> emisyonundaki artışı göstermektedir. 1000 d/d'dan 2500 d/d'ya kadar tüm yakıtlar için NO<sub>x</sub> oluşumunda artış gözlenir iken, 3000 d/d'da tüm yakıtlar için NO<sub>x</sub> oluşumu azalmıştır. 3000 d/d şartlarında silindir içerisindeki artık egzoz gazı yüzdesinin fazla olması reaksiyon sıcaklığının yükselmesini engellediğinden, tüm yakıtlar için NO<sub>x</sub> oluşumu bu devirde azalma göstermiştir.

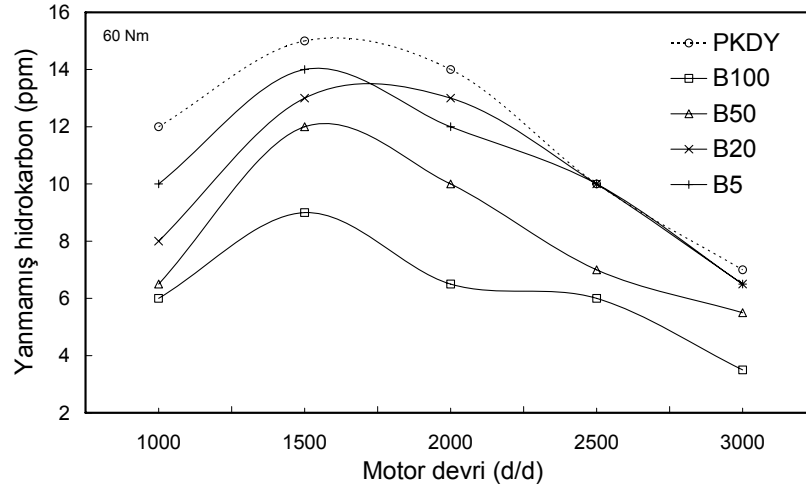


Şekil 5.47: 60 Nm sabit yük ve değişik devir ile azot oksitlerin (NO<sub>x</sub>) değişimi

#### 5.2.3.4. HC emisyonlarının karşılaştırılması

Tam yüke kıyasla, 60 Nm sabit yük şartlarında tüm yakıtların yanmamış HC emisyonu çok az da olsa artış göstermiştir. Tam yük şartlarında, silindir içi sıcaklığın yüksek olması hidrokarbonların tam veya kısmi oksidasyonunu hızlandırmaktadır. Tam yük şartlarında CO ve CO<sub>2</sub> emisyonunun yüksek çıkması, HC emisyonlarının azalmasında etkili olmuştur. 60 Nm sabit yük şartlarında ise tüm yakıtlar için hava-yakıt oranının tam yüke göre daha fazla olması hidrokarbonların oksitlenme bölgelerini artırmıştır. 60 Nm sabit yük şartlarında CO ve CO<sub>2</sub> emisyonu tam yüke

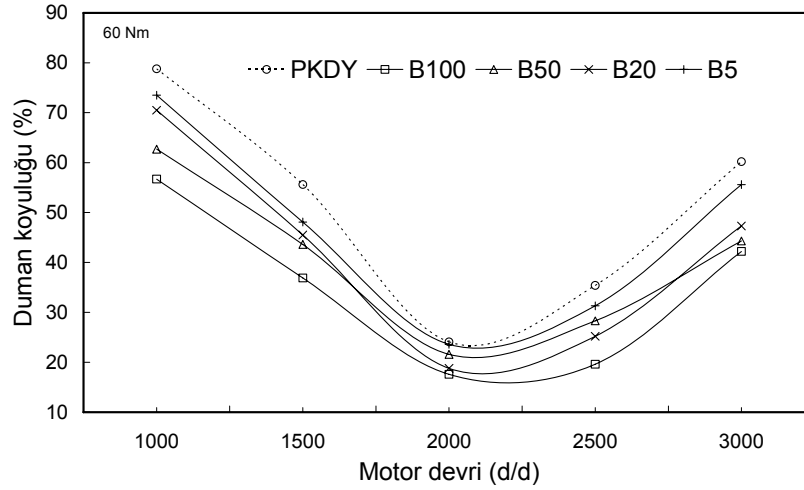
göre azalma gösterirken, azot oksit emisyonu artmıştır. Egzoz gazlarının konsantrasyonundaki bu farklar 60 Nm sabit yük şartlarında ölçülen HC emisyonunun tam yüke göre biraz daha yüksek çıkmasına neden olmuştur. Şekil 5.48’de değişik devirlerde elde edilen yanmamış HC emisyonlarının değişimi gösterilmektedir. Tam yük şartlarında olduğu gibi, 60 Nm sabit yük şartlarında da tüm devirlerde biyodizel ve karışımlarının kullanılmasıyla elde edilen yanmamış HC emisyonu PKDY’ya göre daha düşük seviyede çıkmıştır. Ortalama olarak, B100, B50, B20 ve B5 kullanımı ile yanmamış HC emisyonunda PKDY’ya kıyasla sırasıyla %32,61, %17,39, %17,39 ve %15,22 azalma olmuştur. Daha önce de ifade edildiği gibi, biyodizelin oksijen içeriği yanma bölgelerinin sayısını artırdığından biyodizel ve karışımlarının kullanımı ile yanmamış HC emisyonu azalmaktadır.



Şekil 5.48: 60 Nm sabit yük ve değişik devirlerde yanmamış HC değişimi

### 5.2.3.5. Duman koyuluğunun karşılaştırılması

Tam yük şartlarında 2000, 2500 ve 3000 d/d’da B100 ve B50 kullanımı ile görülen duman koyuluğundaki önemli azalmalar, 60 Nm sabit yük şartlarında görülmemektedir. 60 Nm sabit yük şartlarında, özgül yakıt tüketimine benzer bir eğilimde duman koyuluğu grafiği elde edilmiştir. Şekil 5.49’da duman koyuluğunun değişimi gösterilmektedir.



Şekil 5.49: 60 Nm sabit yük ve değişik devirlerde duman koyuluğunun değişimi

Testlerde ortalama olarak, B100, B50, B20 ve B5 kullanımı ile duman koyuluğunda PKDY'ya göre sırasıyla %31,92, %21,09, %18,42 ve %8,66 azalma gözlenmiştir. Elde edilen değerlerden anlaşıldığı gibi duman koyuluğu karışımdaki biyodizel yüzdesi arttıkça azalmıştır. Biyodizel ve karışımlarının kullanımı ile duman koyuluğundaki azalmanın temel nedeni, biyodizelin oksijen içeriğidir. Tam yükte olduğu gibi 60 Nm sabit yük şartlarında da motor devrinin 1000 d/d ve 1500 d/d olduğu durumlarda duman koyuluğu maksimum düzeyde ölçülmüştür. Düşük motor devirlerinde tüm yakıtların özgül yakıt tüketiminin fazla olması ve silindir içerisindeki döngüsel hava hareketlerinin yavaş olması karbon moleküllerinin oksidasyonunu azaltmaktadır. Motor devri arttıkça döngüsel hava hareketlerinin artmasından dolayı duman koyuluğu azalmaktadır. 3000 d/d'da geldiğinde ise silindir içerisinde artık egzoz gazı yüzdesinin artması duman koyuluğunu artırmıştır.

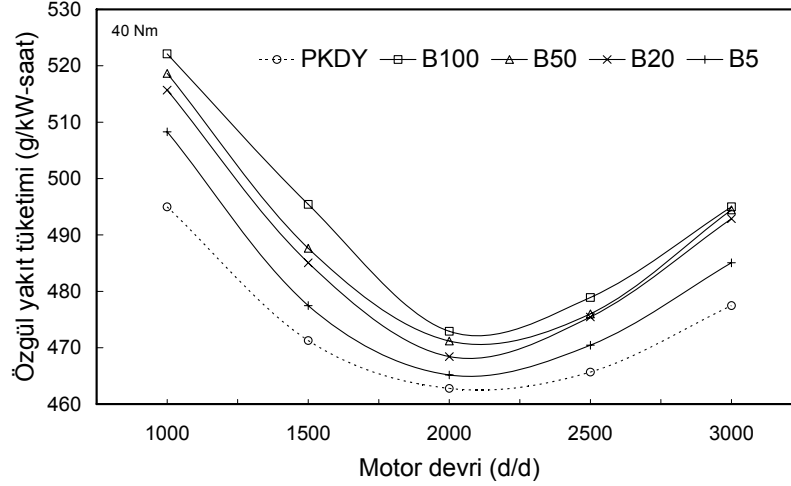
### 5.3. 40 Nm Sabit Yükte Motor Test Sonuçlarının Analizi

#### 5.3.1. Performans karakterlerinin karşılaştırılması

##### 5.3.1.1. Özgül yakıt tüketiminin karşılaştırılması

Tam ve 60 Nm sabit yük şartlarında olduğu gibi 40 Nm sabit yük şartlarında da tüm yakıtlar için maksimum yakıt tüketimini B100 kullanımı ile gerçekleştirmiştir. B100, 1000 d/d'daki 522,10 g/kW-saat değeri ile maksimum özgül yakıt tüketimi

göstermiştir. Şekil 5.50’de 40 Nm sabit yük ve değişik devirlerde özgül yakıt tüketiminin değişimi gösterilmektedir.



Şekil 5.50: 40 Nm sabit yük ve değişik devirlerde özgül yakıt tüketimi

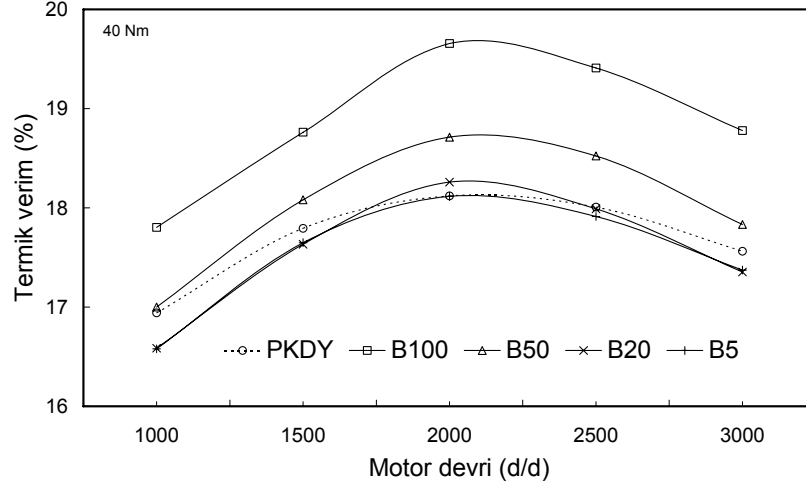
40 Nm sabit yük ve devir şartlarında da, tüm yakıtlar için özgül yakıt tüketimi 2000 d/d’da en düşük değerinde çıkmıştır. 2000 d/d’daki motor testinde, özgül yakıt tüketimi PKDY için 462,79, B5 için 465,17, B20 için 468,43, B50 için 471,20, B100 için 472,91 g/kW-saat olarak ölçülmüştür. 40 Nm sabit yük şartlarında, ortalama olarak B100, B50, B20 ve B5 kullanımı ile özgül yakıt tüketimi, sırasıyla %3,88, %3,19, %2,75, %1,44 PKDY’ya kıyasla artış gözlenmiştir.

### 5.3.1.2. Termik verimin karşılaştırılması

40 Nm sabit yük ve değişik devir şartlarında elde edilen termik verimler Şekil 5.51’de gösterilmektedir. 40 Nm sabit yük şartlarında termik verim %16,5–19,5 arasında değişim göstermiştir. 60 Nm sabit yük şartlarına göre 40 Nm sabit yük şartlarında termik verim azalmıştır. 40 Nm şartlarında özgül yakıt tüketiminin artması termik verimde azalmaya neden olmaktadır. Tam ve 60 Nm sabit yüklerde olduğu gibi 40 Nm sabit yükte de maksimum termik verim özgül yakıt tüketiminin minimum olduğu 2000 d/d’da elde edilmiştir. 2000 d/d’daki termik verim PKDY, B5, B20, B50 ve B100 için sırasıyla %18,12, %18,12, %18,26, %18,71 ve %19,66 olarak hesaplanmıştır. 40 Nm sabit yük testlerinde, ortalama olarak B100 ve B50 kullanımı



ile termik verimde, PKDY göre %1,19 ve %0,34 artış olurken, B20 ve B5 kullanımıyla %0,13 ve %0,16 azalma olmuştur.

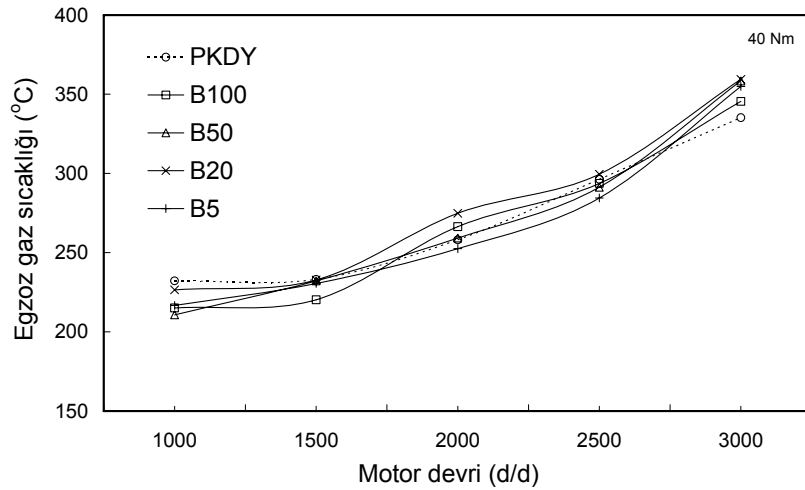


Şekil 5.51: 40 Nm sabit yük ve değişik devirlerde termik verimin değişimi

### 5.3.1.3. Egzoz gazı sıcaklıklarının karşılaştırılması

Tam ve 60 Nm sabit yük şartlarına göre 40 Nm sabit yükte egzoz sıcaklığı önemli derecede azalmıştır. Motor yükünün azalması ile birlikte egzoz sıcaklığının azalmasında en büyük etken, birim zamandaki yakıt tüketiminin azalmasıdır. Motor yükü azaldıkça yakıtların birim zamanda tüketimlerinin birbirine yaklaşması egzoz sıcaklıklarının benzer eğilimler göstermesine neden olmaktadır. Ayrıca, motor yükü azaldıkça ısı dağılımı altında kalan alan krank mili açısı cinsinden küçülmektedir. Bu durum, yanma sonu elde edilen sıcaklığın soğuma süresinin krank mili açısı cinsinden uzamasına yol açmaktadır. Böylece, motor yükü azaldıkça egzoz sıcaklığı azalmaktadır. Aynı zamanda, motor yükü azaldıkça hava fazlalığının artması egzoz sıcaklığının düşmesinde önemli faktörlerdendir. Şekil 5.52'de 40 Nm sabit yük ve değişik devirlerde egzoz gaz sıcaklıklarının değişimi gösterilmektedir. 40 Nm sabit yük şartlarında, maksimum egzoz sıcaklığı 3000 d/d'da, PKDY için 335,2°C, B5 için 354,9°C, B20 için 359,4°C, B50 için 358,4°C, B100 için 345,5°C olarak ölçülmüştür. 3000 d/d'da yakıtların egzoz sıcaklıkları arasındaki fark 15°C'nin altındadır. Motor yükü azaldıkça düşük devirlerdeki yakıtların birim zamandaki tüketimleri arasındaki fark artmaktadır. 40 Nm sabit yükte 1000 d/d'da yakıtların sıcaklıkları arasındaki fark 25°C'nin altındadır. 1000 d/d'da minimum egzoz sıcaklığı B50 için 210,7°C

olarak ölçülmüştür. Şekil 5.53’de görüldüğü gibi, 1000 d/d’da B50 kontrollü yanma periyodunu diğer yakıtlara göre daha erken tamamladığından bu değer elde edilmiştir. 1500 d/d’da minimum egzoz sıcaklığı B100 için 220,2°C olarak ölçülmüştür. Şekil 5.54’de B100 ve B5 kontrollü yanma periyodunu diğer yakıtlara göre daha erken tamamladığı görülmektedir. Sabit yük şartlarında, kontrollü yanmayı erken tamamlayan yakıtlarda egzoz sıcaklığı genelde en düşük seviyede çıkmıştır.



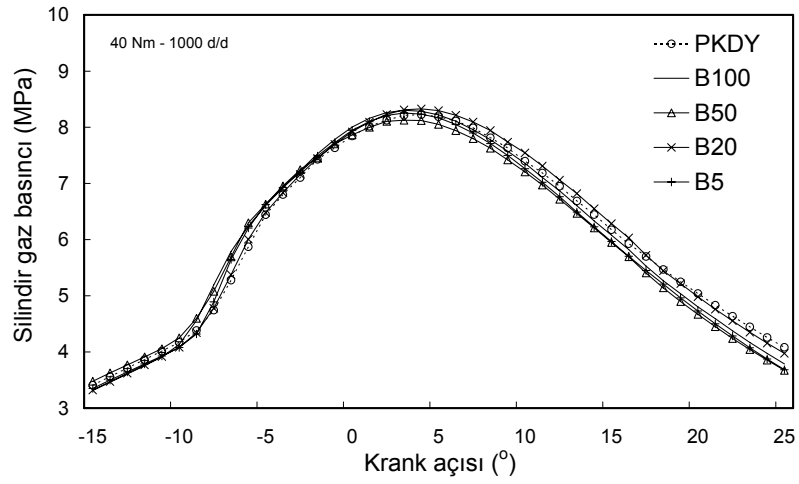
Şekil 5.52: 40 Nm sabit yük ve değişik devirlerde egzoz gaz sıcaklıklarının değişimi

### 5.3.2. Yanma ve püskürtme karakterlerinin karşılaştırılması

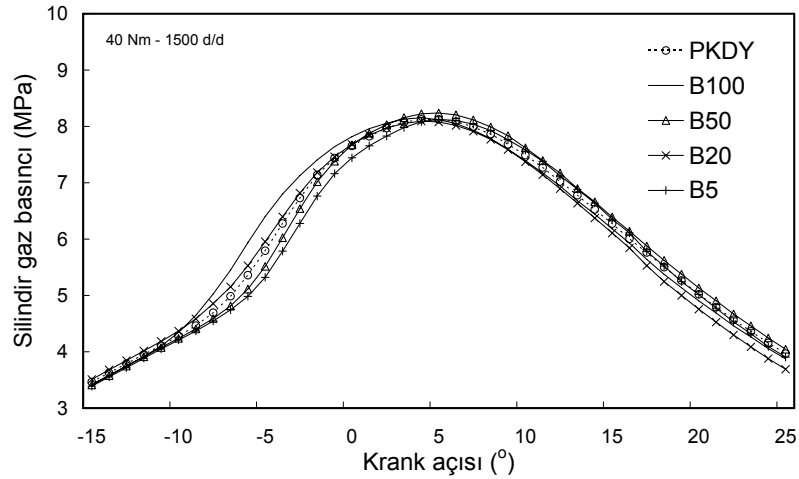
#### 5.3.2.1. Silindir gaz basınçlarının karşılaştırılması

40 Nm sabit yük ve değişik devir şartlarında, tüm yakıtların maksimum silindir gaz basınçlarının elde edildiği noktalar aynı devir için birbirine çok benzemektedir. Bu durum, ön yanma odalı bir dizel motordaki reaksiyon oluşturma prosesinin bir sonucu olarak yorumlanmıştır. Daha öncede ifade edildiği üzere ön yanma odalı dizel motorlarda karışım oluşum başlangıcı ana yanma odası ile bağlantılı bir ön odacıkta gerçekleşmektedir. Bu durum yakıt tipinin yanmaya etkisini biraz daha azaltmaktadır. Şekil 5.53, 5.54, 5.55, 5.56, 5.57’de 40 Nm sabit yük ve değişik devirlerde silindir gaz basıncının KA’ya göre değişimi gösterilmektedir. Tam yük, 60 ve 40 Nm sabit yük şartları incelendiğinde, motor yükü azaldıkça silindir gaz basıncının yükselme ve genişleme zamanı altında kalan alanın KA cinsinden küçüldüğü görülmektedir. 60 Nm sabit yükte olduğu gibi, 40 Nm sabit yük

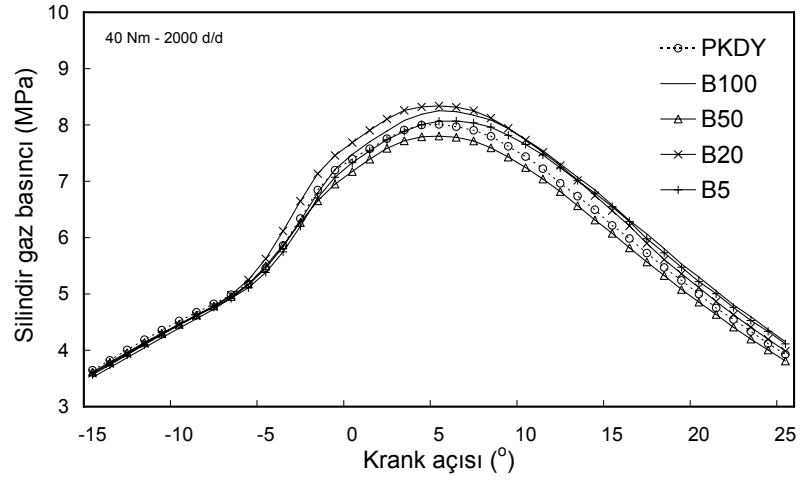
şartlarında da maksimum silindir gaz basıncını biyodizel ve karışımlarının kullanılması ile elde edilmiştir. 1000 ve 2000 d/d'da B20, 1500 d/d'da B50, 2500 ve 3000 d/d'da B100'ün silindir gaz basıncı en yüksek seviyede çıkmıştır. Ayrıca, 60 Nm olduğu gibi 1000, 1500, 2000 d/d'da maksimum silindir gaz basıncı noktaları KA cinsinden çok kısa bir süre kalırken, 2500 ve 3000 d/d'da yaklaşık 4-5° KA maksimum silindir gaz basıncı tepesinin uzadığı gözlenmiştir. 40 Nm sabit yük şartlarında, tüm motor devirleri için maksimum silindir gaz basıncı 3° ile 6° KA arasında gerçekleşmiştir.



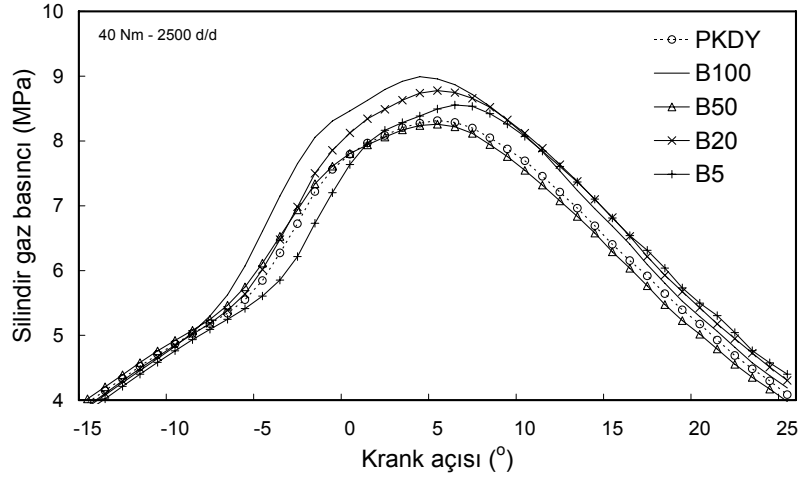
Şekil 5.53: 40 Nm sabit yük ve 1000 d/d'da silindir gaz basıncının KA'ya göre değişimi



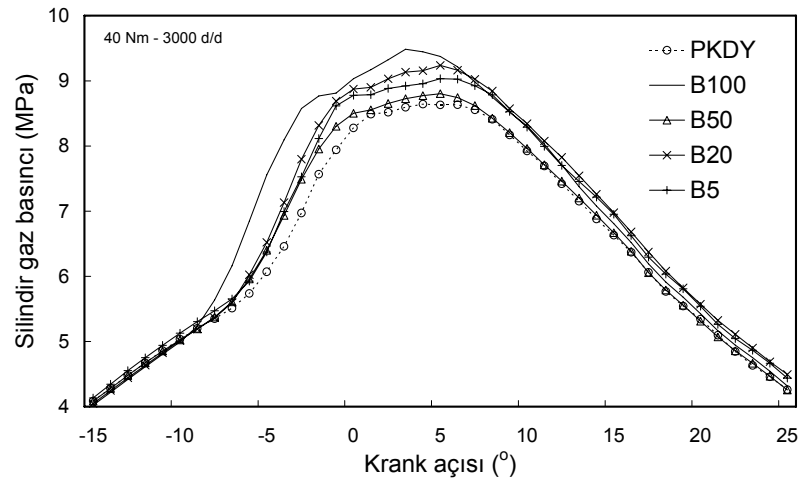
Şekil 5.54: 40 Nm sabit yük ve 1500 d/d'da silindir gaz basıncının KA'ya göre değişimi



Şekil 5.55: 40 Nm sabit yük ve 2000 d/d’da silindir gaz basıncının KA’ya göre değişimi



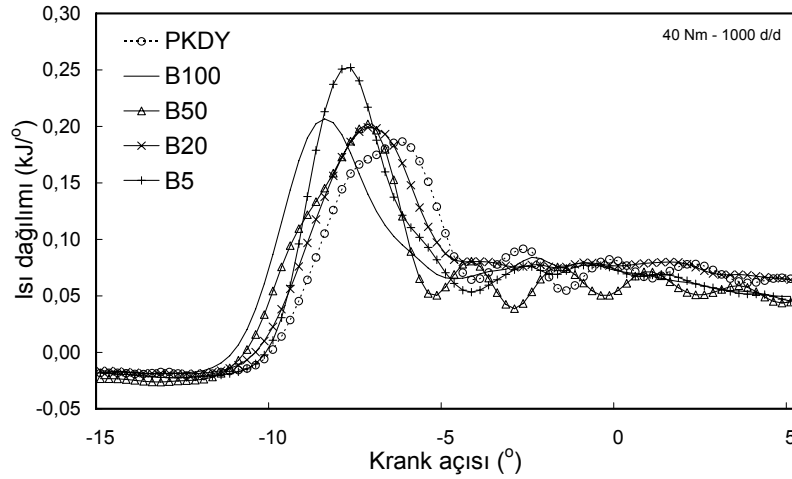
Şekil 5.56: 40 Nm sabit yük ve 2500 d/d’da silindir gaz basıncının KA’ya göre değişimi



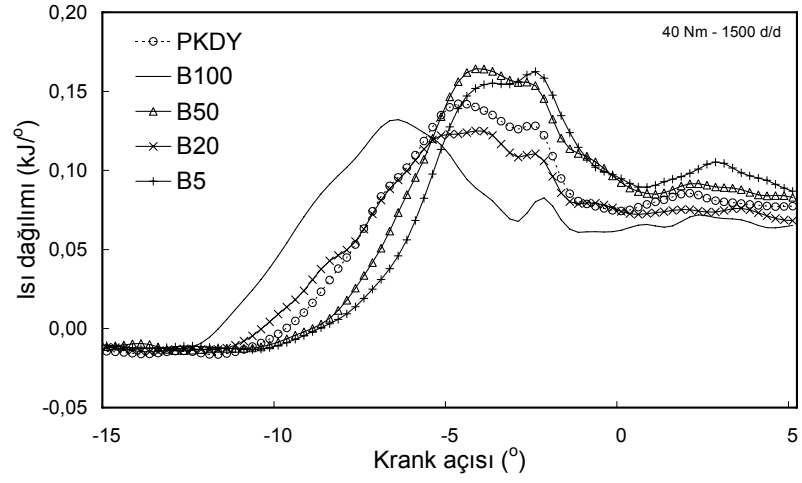
Şekil 5.57: 40 Nm sabit yük ve 3000 d/d’da silindir gaz basıncının KA’ya göre değişimi

### 5.3.2.2. Isı dağılımlarının karşılaştırılması

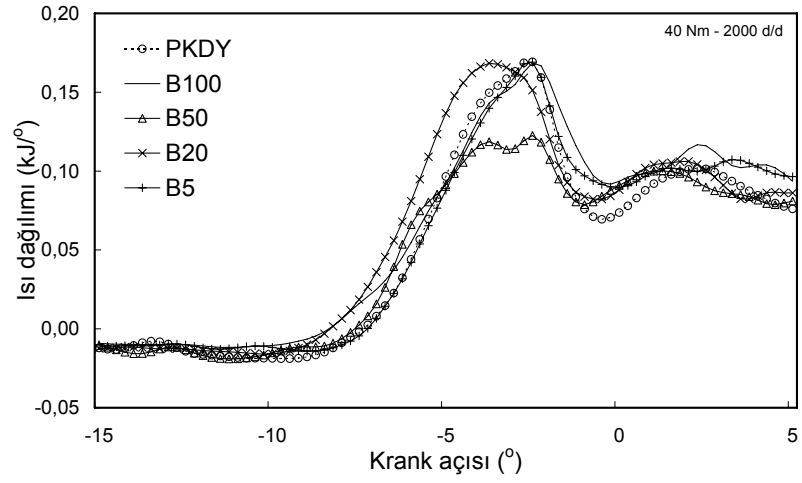
Şekil 5.58, 5.59, 5.60, 5.61, 5.62’de 40 Nm sabit yük ve değişik devirlerde ısı dağılımının KA’ya göre değişimi gösterilmektedir. 40 Nm sabit yükte de tüm devirlerde B100, B50 ve B20’nin ısı dağılımı B5 ve PKDY’ya göre daha erken başlamıştır. Bu duruma, B100, B50 ve B20’nin püskürtme başlangıçlarının PKDY ve B5 göre daha erken başlaması neden olmuştur. 40 Nm sabit yük şartlarında tüm devirlerde, PKDY ve B5’in ısı dağılımındaki tepe noktası, ya maksimum ya da maksimum noktaya yakın çıkmıştır. KA açısı cinsinden bakıldığında ise B100, B50 ve B20’ye göre hafifçe daha dar bir alana sahip olduğu gözlenmektedir. Bu durum, 40 Nm sabit yük şartlarında PKDY ve B5’in ani yanma safhasının B100, B50 ve B20’ye göre daha hızlı gerçekleştiğini göstermektedir. Bu duruma neden olarak, PKDY’nin biyodizel göre uçuculuğunun ve özgül yakıt tüketiminin daha düşük olması gösterilebilir. Yakıtların uçuculuğunun ısı dağılımı üzerine etkisi, motor yükü azaldıkça (silindir gaz basıncının azalması ve hava fazlalığının artması ile) biraz daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmıştır. Tam ve 60 Nm sabit yük şartlarında olduğu gibi 40 Nm sabit yükte de tüm yakıtların ani ısı dağılımları altında kalan alanlar kesişmektedir. KA cinsinden tamamen farklı bir noktada ısı dağılımı alanı görülmemiştir.



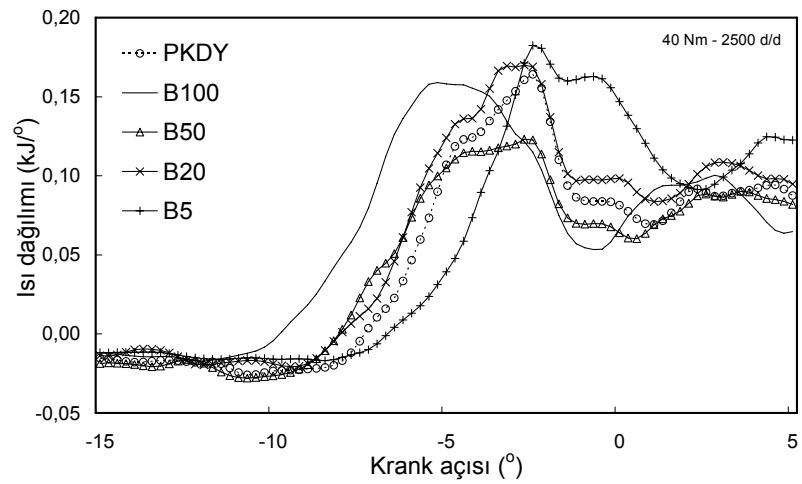
Şekil 5.58: 40 Nm sabit yük ve 1000 d/d’da ısı dağılımının KA’ya göre değişimi



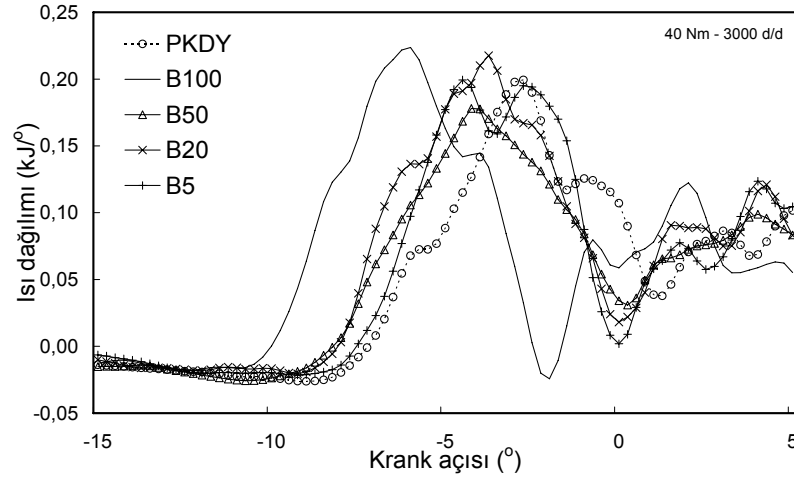
Şekil 5.59: 40 Nm sabit yük ve 1500 d/d'da ısı dağılımının KA'ya göre değişimi



Şekil 5.60: 40 Nm sabit yük ve 2000 d/d'da ısı dağılımının KA'ya göre değişimi



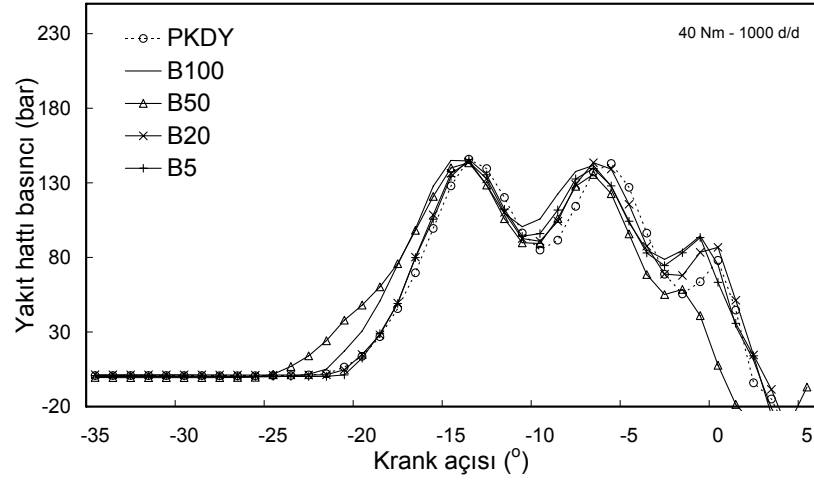
Şekil 5.61: 40 Nm sabit yük ve 2500 d/d'da ısı dağılımının KA'ya göre değişimi



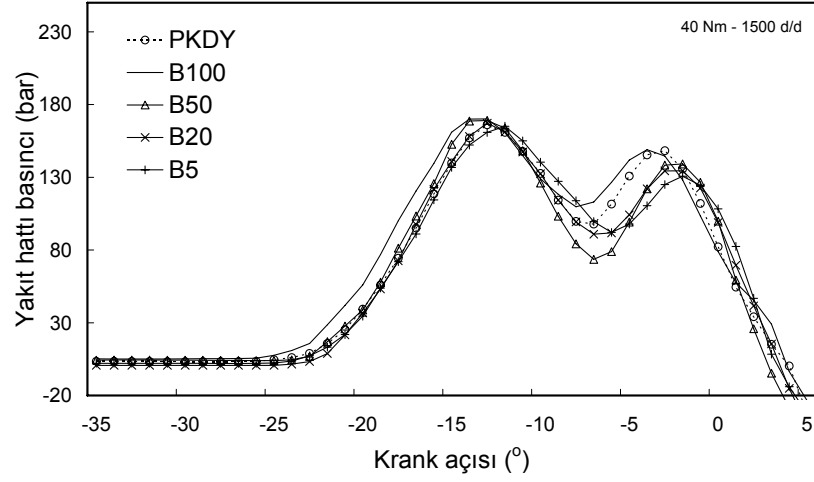
Şekil 5.62: 40 Nm sabit yük ve 3000 d/d'da ısı dağılımının KA'ya göre değişimi

### 5.3.2.3. Yakıt hattı basınçlarının ve tutuşma gecikmesinin karşılaştırılması

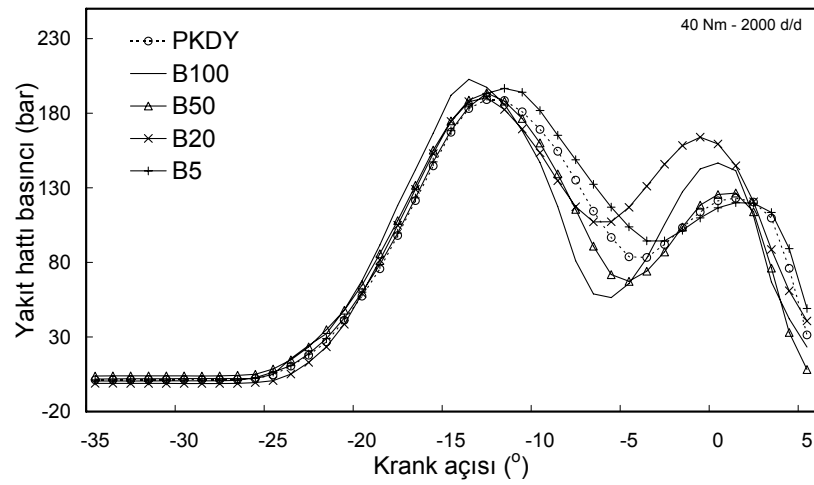
60 Nm sabit yük şartlarında olduğu gibi, 40 Nm sabit yük şartlarında da yakıtların maksimum yakıt hattı basınçları ve püskürtme eğilimleri genelde birbirine benzer çıkmıştır. Bu sonuca, testlerin aynı yük ve devir şartlarında gerçekleşmesi etki etmiştir. 40 Nm şartlarında, biyodizelin yakıt özelliklerinin etkisi 60 Nm şartlarına göre daha belirgin ortaya çıkmıştır. Şekil 5.63, 5.64 5.65, 5.66, 5.67'de 40 Nm sabit yük ve değişik devirlerde yakıt hattı basıncının KA'ya göre değişimi gösterilmektedir. Biyodizelin kullanılması ile püskürtme başlangıcı PKDY göre 1000, 1500, 2000, 2500, 3000 d/d'da sırasıyla 0,99°, 1°, 0,87°, 2,13°, 1,52° KA daha erken olmuştur. Ayrıca, 40 Nm şartlarında, tüm devirlerde B100 kullanımı ile yakıt hattında ani basınç yükselmesi meydana gelmiştir. 40 Nm şartlarında B100'ün özellikle 2500 ve 3000 d/d'da maksimum silindir gaz basıncına sahip olması, püskürtme sırasındaki karşıt basıncın yüksek olmasına neden olmaktadır. Ayrıca, biyodizelin PKDY göre viskozitesi ve yoğunluğu daha yüksektir. Bu iki etkenin yakıt hattındaki ani basınç yükselmesinde etkili olduğu düşünülmüştür. Tüm devirlerde B100 dışında, B50, B20, B5 ve PKDY KA cinsinden birbirlerine benzer bir yapı sergilemiştir. Özellikle B5 ve B20'nin püskürtme başlangıcı tüm devirlerde PKDY'a çok yakındır. 60 Nm sabit yük şartlarına göre 40 Nm sabit yük şartlarında birim zamanda püskürtülen yakıtın daha az olması nedeniyle, püskürtme başlangıcı 1-2° KA ÜÖN'ya yaklaşmıştır. Püskürtme süresi KA cinsinden 60 Nm şartlarına göre azalmıştır. Tüm yakıtlar için devir arttıkça püskürtme süresi KA cinsinden artmıştır.



Şekil 5.63: 40 Nm sabit yük ve 1000 d/d'da yakıt hattı basıncının KA'ya göre değişimi

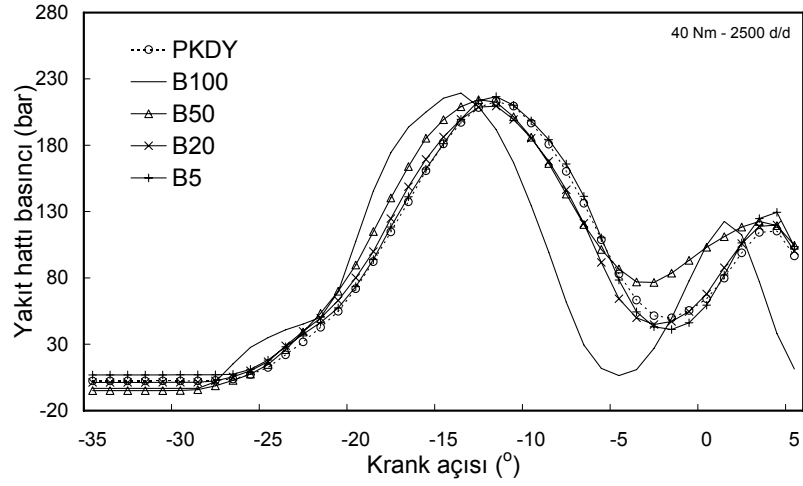


Şekil 5.64: 40 Nm sabit yük ve 1500 d/d'da yakıt hattı basıncının KA'ya göre değişimi

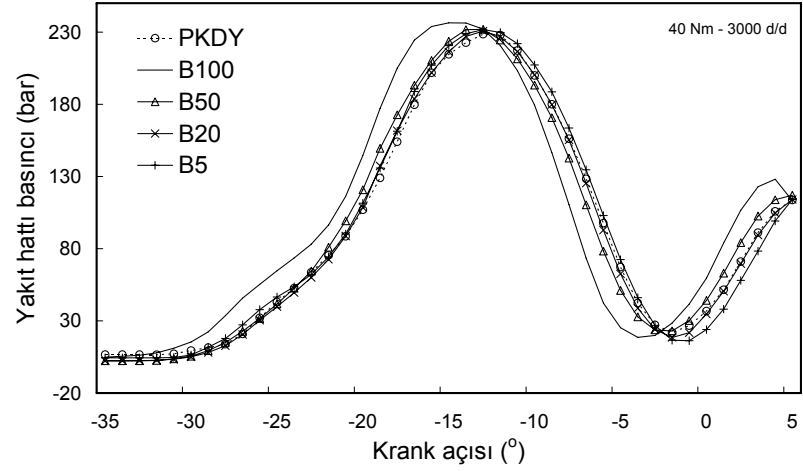


Şekil 5.65: 40 Nm sabit yük ve 2000 d/d'da yakıt hattı basıncının KA'ya göre değişimi





Şekil 5.66: 40 Nm sabit yük ve 2500 d/d'da yakıt hattı basıncının KA'ya göre değişimi



Şekil 5.67: 40 Nm sabit yük ve 3000 d/d'da yakıt hattı basıncının KA'ya göre değişimi

Tam ve 60 Nm sabit yükte olduğu gibi 40 Nm sabit yükte de biyodizelin tutuşma gecikmesi PKDY göre daha kısadır. Biyodizel ile PKDY arasında maksimum fark 2000, 2500 ve 3000 d/d'da, sırasıyla 1,13°, 1,12°, 1,23° KA çıkmıştır. Tam ve 60 Nm sabit yük şartlarındaki maksimum tutuşma gecikmesi farkları incelendiğinde bu sonuç, motor yükü azaldıkça yakıtların tutuşma gecikmesi arasındaki farkın biraz daha azaldığını göstermektedir. Tam ve 60 Nm sabit yükte olduğu gibi 40 Nm sabit yükte de tüm yakıtların tutuşma gecikmesi süresi motor devri arttıkça KA cinsinden artmaktadır. 40 Nm sabit yük şartlarında B5 ve B20'nin tutuşma gecikmesi PKDY'a çok yakın çıkmıştır. Hatta B5'in 1500, 2000 ve 2500 d/d'daki tutuşma gecikmesi PKDY göre çok az daha uzundur. Bu durum, 40 Nm sabit yük şartlarında B5'in püskürtme başlangıcının KA cinsinden PKDY'a benzemesinden kaynaklanmaktadır.

Tablo 5.13, 5.14, 5.15, 5.16, 5.11’de 40 Nm sabit yük ve değişik devirlerde püskürtme ve ısı dağılımı başlangıçları, tutuşma gecikmesi süresi KA cinsinden verilmektedir.

Tablo 5.13: 40 Nm sabit yük ve 1000 d/d’da tutuşma gecikmesi

1000 d/d				
Yakıt	PB(°)	IDB (°)	TG (°)	TGS (sn)
PKDY	14,92	11,00	3,92	0,000653
B100	15,91	12,75	3,16	0,000527
B50	15,57	12,50	3,07	0,000512
B20	15,27	12,00	3,27	0,000545
B5	15,15	11,50	3,65	0,000608

PB -Püskürtme Başlangıcı, IDB -Isı Dağılımı Başlangıcı,  
TG -Tutuşma Gecikmesi, TGS -Tutuşma Gecikmesi Süresi

Tablo 5.14: 40 Nm sabit yük ve 1500 d/d’da tutuşma gecikmesi

1500 d/d				
Yakıt	PB(°)	IDB (°)	TG (°)	TGS (sn)
PKDY	15,50	11,25	4,25	0,000472
B100	16,50	12,75	3,75	0,000417
B50	15,83	11,50	4,33	0,000481
B20	15,58	11,50	4,08	0,000453
B5	15,33	10,75	4,58	0,000509

Tablo 5.15: 40 Nm sabit yük ve 2000 d/d’da tutuşma gecikmesi

2000 d/d				
Yakıt	PB(°)	IDB (°)	TG (°)	TGS (sn)
PKDY	16,63	9,25	7,38	0,000615
B100	17,50	11,25	6,25	0,000521
B50	17,06	10,75	6,31	0,000526
B20	16,96	10,00	6,96	0,000580
B5	16,72	9,25	7,47	0,000623

Tablo 5.16: 40 Nm sabit yük ve 2500 d/d’da tutuşma gecikmesi

2500 d/d				
Yakıt	PB(°)	IDB (°)	TG (°)	TGS (sn)
PKDY	17,31	8,50	8,81	0,000587
B100	19,44	11,75	7,69	0,000513
B50	18,43	10,50	7,93	0,000529
B20	17,81	9,25	8,56	0,000571
B5	17,50	8,50	9,00	0,000600

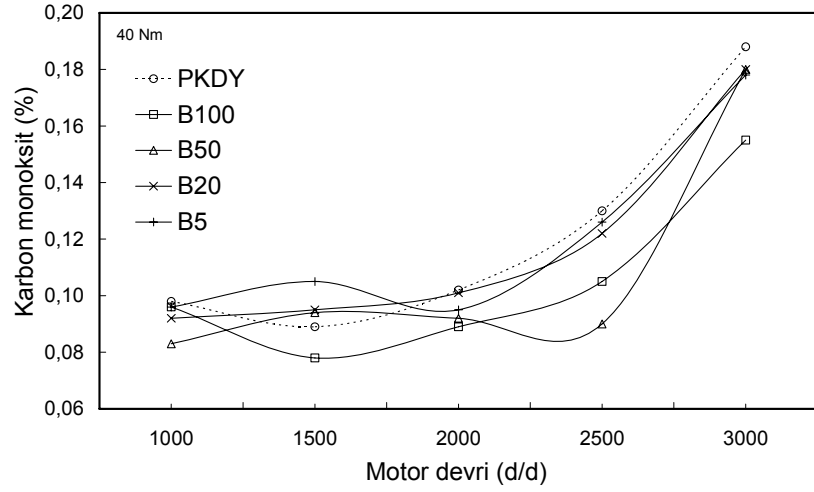
Tablo 5.17: 40 Nm sabit yük ve 3000 d/d'da tutuşma gecikmesi

3000 d/d				
Yakıt	PB(°)	IDB (°)	TG (°)	TGS (sn)
PKDY	18,96	8,75	10,21	0,000567
B100	20,48	11,50	8,98	0,000499
B50	19,70	10,50	9,20	0,000511
B20	19,27	9,25	10,02	0,000557
B5	19,20	9,00	10,20	0,000567

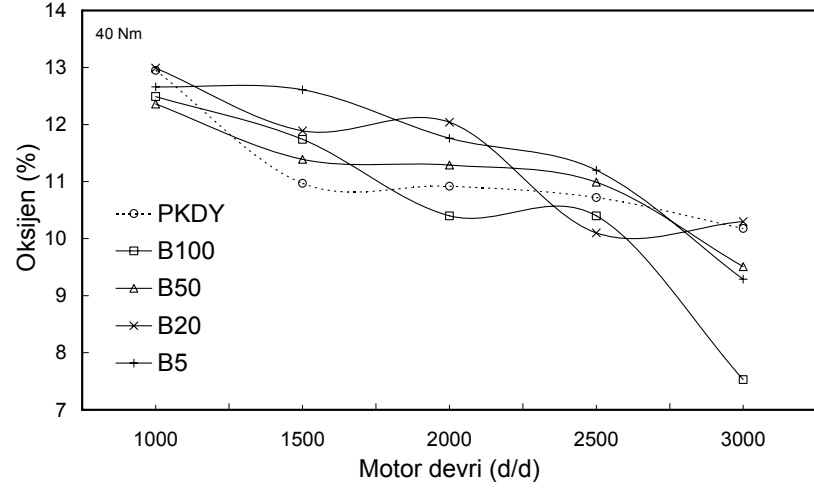
### 5.3.3. Egzoz emisyon karakterlerinin karşılaştırılması

#### 5.3.3.1. CO emisyonlarının karşılaştırılması

60 Nm sabit yük şartları ile karşılaştırıldığında, 40 Nm sabit yük şartlarında hava fazlalığının artması, CO emisyonunda önemli azalmalar sağlamıştır. Şekil 5.68'de 40 Nm sabit yük ve değişik devirlerde karbon monoksit yüzdesinin değişimi gösterilmektedir. Düşük motor yüklerinde yakıt-hava karışımındaki küçük sapmaların bile CO emisyonunda değişime yol açtığı gözlenmiştir. Ayrıca, 40 Nm sabit yük şartlarında CO emisyonundaki değişim ile hava-yakıt oranındaki değişim paralel bir yapı sergilemektedir. Tablo 5.18'de 40 Nm sabit yükte motor devrine göre hava-yakıt oranlarının değişimi verilmektedir. Tüm devirlerde B100 kullanımı ile ölçülen CO emisyonu PKDY göre daha düşük seviyede çıkmıştır. B100, B50, B20 ve B5 kullanımı ile ölçülen CO emisyonu, PKDY kullanımına göre ortalama olarak azalma göstermiştir. B100, B50, B20 ve B5 kullanımı ile CO emisyonunda PKDY'ye göre ortalama olarak, sırasıyla %13,84, %11,20, %2,80 ve %1,15 azalma gözlenmiştir. Tüm yakıtların maksimum CO emisyonu 3000 d/d'da ortaya çıkmıştır. 3000 d/d'da dışındaki devirlerde yakıtların ürettiği CO emisyonu yataya yakın bir eğim izlemiştir. 40 Nm şartlarında egzozdaki oksijen konsantrasyonu oldukça yüksek seviyede ölçülmüştür. Şekil 5.69'da 40 Nm sabit yük ve değişik devirlerde oksijen yüzdesinin değişimi gösterilmektedir.



Şekil 5.68: 40 Nm sabit yük ve değişik devirlerde CO emisyonunun değişimi



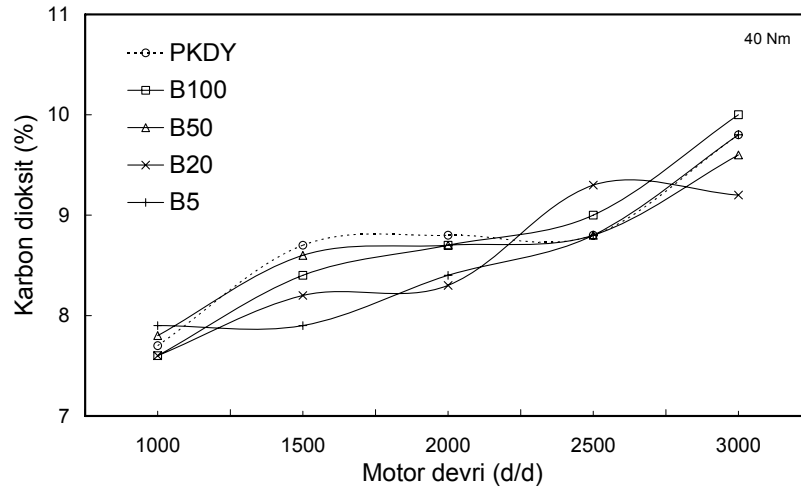
Şekil 5.69: 40 Nm sabit yük ve değişik devirlerde O<sub>2</sub> yüzdesinin değişimi

Tablo 5.18: 40 Nm sabit yükte motor devrine göre hava-yakıt oranları

Yakıt	1000	1500	2000	2500	3000
PKDY	25,74	23,50	25,64	24,01	22,05
B100	25,33	22,55	25,31	24,48	21,63
B50	24,24	22,41	24,95	23,38	21,20
B20	25,54	22,93	25,37	23,97	21,45
B5	25,29	23,30	25,98	24,57	21,98

### 5.3.3.2. CO<sub>2</sub> emisyonlarının karşılaştırılması

40 Nm sabit yük ve değişik devir ile karbon dioksit yüzdesinin değişimi Şekil 5.70'de gösterilmektedir. 60 Nm sabit yükte CO<sub>2</sub> konsantrasyonu %8,8–11,6 arasında seyrederken, 40 Nm sabit yükte %7,6–10 arasında değişim göstermiştir. Tam yük, 60 ve 40 Nm sabit yük şartları incelendiğinde, motor yükü azaldıkça CO<sub>2</sub> konsantrasyonunun azaldığı görülmektedir. Bu durum, 40 Nm sabit yük şartlarında birim zamanda püskürtülen yakıt miktarının tam ve 60 Nm sabit yük şartlarına göre daha az olmasından kaynaklanmaktadır. Ortalama olarak, B100, B50, B20 ve B5 kullanımıyla CO<sub>2</sub> emisyonunda sırasıyla %0,23, %0,68, %2,74 ve %2,28 PKDY'a kıyasla azalma görülmüştür. 1000, 1500, 2000 d/d'da biyodizel kullanımı ile PKDY'a kıyasla sırasıyla %1,3, %3,6, %1,1 azalma görülürken, 2500 ve 3000 d/d'da %2,2 ve %2 artış olmuştur. Ayrıca, 60 Nm sabit yük şartlarında olduğu gibi, 40 Nm sabit yük şartlarında da tüm yakıtlar birbirine benzer eğilimlerde CO<sub>2</sub> emisyonu üretmişlerdir. Her yakıt motor devrinin artışı ile artan miktarda CO<sub>2</sub> emisyonu üretmiştir.

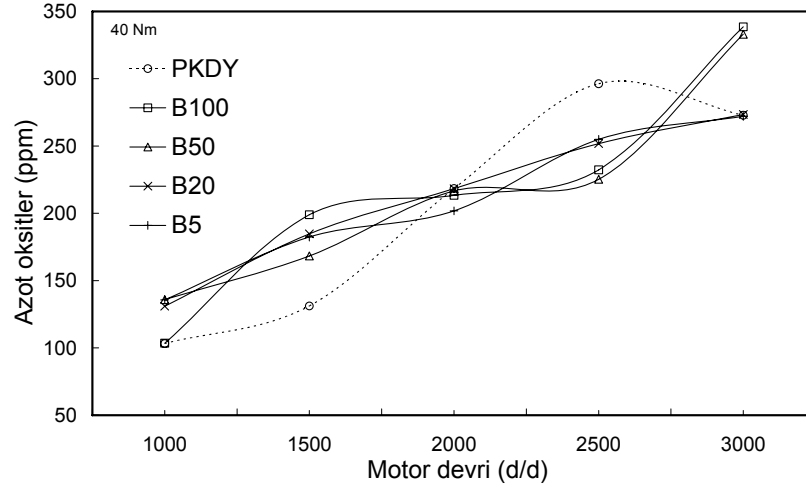


Şekil 5.70: 40 Nm sabit yük ve değişik devirlerde CO<sub>2</sub> emisyonunun değişimi

### 5.3.3.3. NO<sub>x</sub> emisyonlarının karşılaştırılması

Tam yük ve 60 Nm sabit yüke göre, 40 Nm sabit yükte hava-yakıt oranının artması veya motor yükünün azalması NO<sub>x</sub> oluşumunu artırmıştır. 60 Nm sabit yük şartlarında olduğu gibi, 40 Nm sabit yük şartlarında da tüm yakıtlar için NO<sub>x</sub>

oluşumu belirli bir eğilimde seyretmiştir. Şekil 5.71’de 40 Nm sabit yük ve değişik devirde düzeltme faktörü ile çarpılarak elde edilen azot oksitlerin değişimi gösterilmektedir.



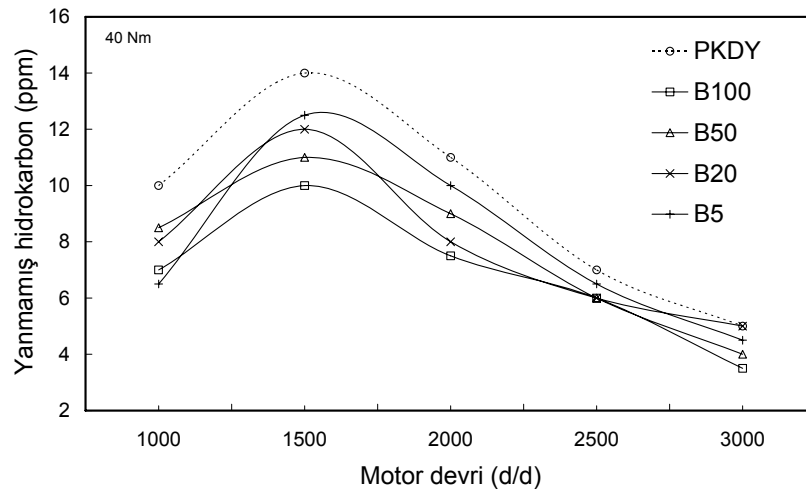
Şekil 5.71: 40 Nm sabit yük ve değişik devir ile azot oksitlerin (NO<sub>x</sub>) değişimi

1000 d/d'dan 3000 d/d'ya kadar PKDY hariç tüm yakıtlar için NO<sub>x</sub> oluşumu artmıştır. 1000, 2000, 2500 d/d'ya göre 1500 ve 3000 d/d'da hava-yakıt oranının azalması PKDY ile NO<sub>x</sub> oluşumunu azaltmıştır. 40 Nm sabit yük şartlarında, PKDY kullanımı ile ölçülen NO<sub>x</sub> emisyonun hava-yakıt oranının değişiminden önemli derecede etkilendiği görülmüştür. Biyodizelin oksijen içeriğinin ise biyodizel ve karışımlarının kullanımı sırasındaki hava-yakıt oranının değişimindeki farkların etkisini kapattığı düşünülmüştür. Ayrıca, özellikle 2500 ve 3000 d/d'da B100 ve B50 kullanımı ile ölçülen silindir gaz basıncının daha geniş bir aralıkta yüksek basınçta kalması B100 ve B50 ile ısıl NO<sub>x</sub> oluşumunu artırdığı düşünülmüştür. 1500 d/d'da PKDY ile B5'in püskürtme başlangıçlarının birbirine çok yakın olması ve B5'in tutuşma gecikmesi süresinin PKDY göre daha uzun olması ani reaksiyon sıcaklığını artırdığından, bu devirde B5 ile PKDY arasında ısıl NO<sub>x</sub> oluşum farkları ortaya çıkmıştır. B5 ile PKDY arasında 1500 d/d'ya benzer bir durum 2500 d/d'da da gözükmemektedir. Fakat bu devirde B5'in püskürtme başlangıcı biraz daha erken ve tutuşma gecikmesi 1500 d/d'daki kadar uzun değildir. 60 Nm sabit yükte olduğu gibi 40 Nm sabit yükte de 2500 d/d'da maksimum NO<sub>x</sub> oluşumunu PKDY kullanımı ile gerçekleştirmiştir. 2500 devirde PKDY kullanımı ile atomizasyon oranının artması ve hava-yakıt oranının yüksek olması ısıl NO<sub>x</sub> oluşumunu artırmıştır. Atomizasyon oranının

arttığı, 60 ve 40 Nm sabit yükte 2500 devirde, PKDY kullanımı ile özgül yakıt tüketimi minimum seviyeye çok yakın çıkmasından anlaşılmıştır. 40 Nm sabit yük şartlarında ortalama olarak, B100, B50, B20 ve B5 kullanımıyla ölçülen NO<sub>x</sub> emisyonu sırasıyla %6,31 %5,60, %3,64 ve %2,43 PKDY'ya kıyasla artmıştır. Bu sonuç, 60 Nm sabit yükte elde edilen ortalama değerlerin hemen hemen yarısını göstermektedir. Bu değerler, biyodizelin yüzdesi ile ilişkili olarak NO<sub>x</sub> emisyonunda artış olduğunu kanıtlayacak niteliktedir.

#### 5.3.3.4. HC emisyonlarının karşılaştırılması

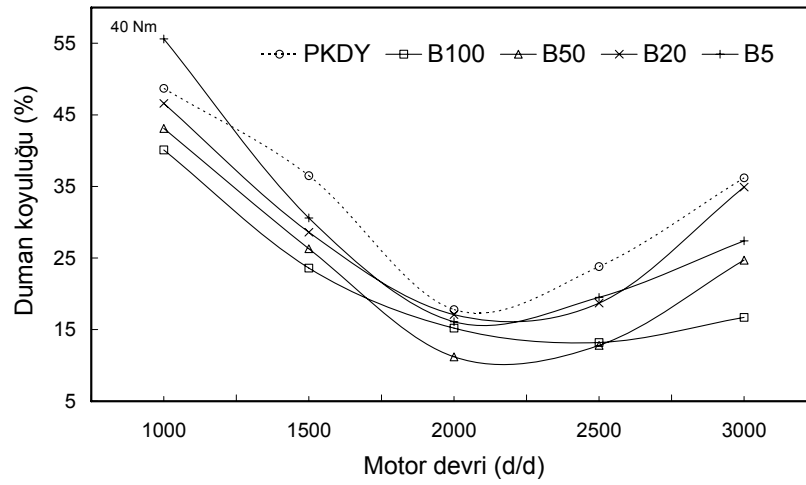
40 Nm şartlarında tüm yakıtların yanmamış HC emisyonu seviyesi 60 Nm şartlarına benzemektedir. Tam yük ve 60 Nm sabit yük şartlarında olduğu gibi, 40 Nm sabit yük şartlarında da tüm devirlerde biyodizel ve karışımlarının kullanılmasıyla elde edilen yanmamış HC emisyonu PKDY'ya göre daha düşük seviyede çıkmıştır. Ortalama olarak, B100, B50, B20 ve B5 kullanımı ile yanmamış HC emisyonunda PKDY'ya kıyasla sırasıyla %27,66, %18,09, %17,02 ve %14,89 azalma olmuştur. Şekil 5.72'de 40 Nm sabit yük ve değişik devirlerde yanmamış HC emisyonun değişimi gösterilmektedir. 40 Nm sabit yük şartlarında, 1000 d/d'da tüm yakıtların özgül yakıt tüketiminin fazla olması, 1500 d/d'da ise tüm yakıtlar için hava-yakıt oranının düşmesi yanmamış HC emisyon seviyesinin bu devirlerde yüksek çıkmasına neden olmuştur.



Şekil 5.72: 40 Nm sabit yük ve değişik devirlerde yanmamış HC değişimi

### 5.3.3.5. Duman koyuluğunun karşılaştırılması

40 Nm sabit yük şartlarında, 60 Nm yük şartlarına benzeyen fakat biraz daha kompleks bir duman koyuluğu grafiği elde edilmiştir. Bu durumun sebebi olarak hava-yakıt oranının artması gösterilebilir. Ayrıca, 40 Nm şartlarında hava-yakıt oranının artması sonucu duman koyuluğu seviyesi 60 Nm'ye göre düşmüştür. Şekil 5.73'de 40 Nm sabit yük ve değişik devirlerde duman koyuluğunun değişimi gösterilmektedir.



Şekil 5.73: 40 Nm sabit yük ve değişik devirlerde duman koyuluğunun değişimi

Testlerde ortalama olarak, B100, B50, B20 ve B5 kullanımı ile duman koyuluğunda PKDY'ye göre sırasıyla %33,25, %27,55, %10,49 ve %8,47 azalma gözlenmiştir. 40 Nm şartlarında, 60 Nm sabit yük şartlarındaki ortalama değerlere benzer azalma görülmüştür. 40 Nm sabit yük ve 1000 d/d'da, B5'in özgül yakıt tüketiminin PKDY göre yüksek olması etkisini göstererek, bu devirde B5'in duman koyuluğunun maksimum seviyede çıkmasına neden olmuştur. 3000 d/d'da B20'nin özgül yakıt tüketiminin fazla olması B20'nin duman koyuluğu seviyesini PKDY yaklaştırmıştır.

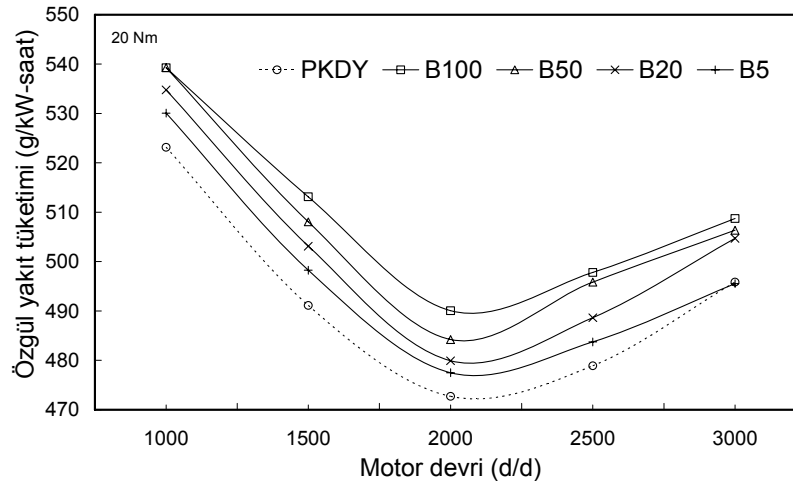


## 5.4. 20 Nm Sabit Yükte Motor Test Sonuçlarının Analizi

### 5.4.1. Performans karakterlerinin karşılaştırılması

#### 5.4.1.1. Özgül yakıt tüketiminin karşılaştırılması

Tam, 60, 40 ve 20 Nm deki özgül yakıt tüketimi grafikleri incelendiğinde, motor yükünün azalması ile birim güç başına tüketilen yakıt miktarında bir artış olduğu ortaya çıkmıştır. Birim zamandaki (g/s) yakıt tüketimi incelediğinde ise motor yükünün azalması ile yakıt tüketimi de azalmaktadır. Dizel motorlarda motor yükü püskürtülen yakıt miktarına göre tanımlanması birim zamandaki yakıt tüketimi cinsindedir. Tam yük, 60, 40 Nm sabit yük şartlarında olduğu gibi 20 Nm sabit yük şartlarında da tüm yakıtlar için maksimum yakıt tüketimini B100 kullanımı ile gerçekleştirmiştir. B100, 1000 d/d'daki 539,27 g/kW-saat değeri ile 20 Nm sabit yük şartlarında maksimum özgül yakıt tüketimi göstermiştir. Şekil 5.74'de 20 Nm sabit yük ve değişik devirlerde özgül yakıt tüketiminin değişimi gösterilmektedir.



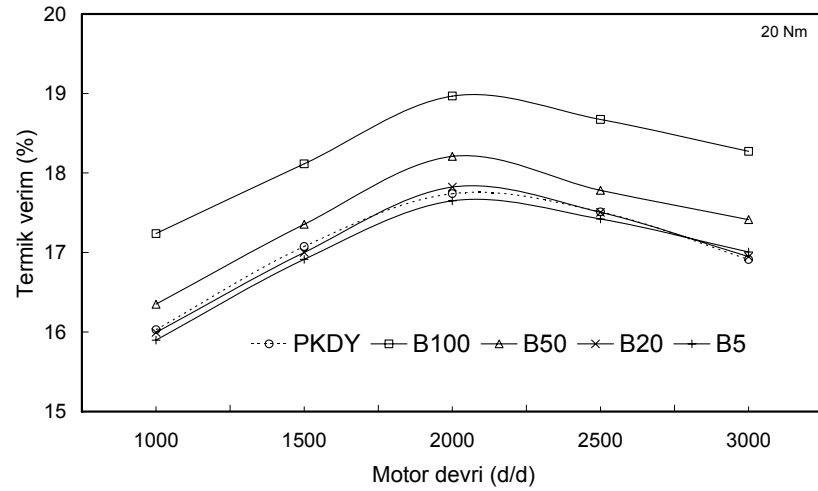
Şekil 5.74: 20 Nm sabit yük ve değişik devirlerde özgül yakıt tüketimi

20 Nm sabit yük ve değişik devir şartlarında, tüm yakıtlar için özgül yakıt tüketimi 2000 d/d'da en düşük değerde çıkmıştır. 2000 d/d'daki motor testinde, özgül yakıt tüketimi PKDY için 472,70, B5 için 477,48, B20 için 479,90, B50 için 484,20, B100 için 490,04 g/kW-saat olarak ölçülmüştür. Ortalama olarak B100, B50, B20 ve B5'in özgül yakıt tüketimi, sırasıyla %3,54, %2,92, %2,01, %0,95 PKDY'ya kıyasla daha

yüksektir. Tam yük, 60, 40 ve 20 Nm sabit yük şartları incelendiğinde, motor yükünün azalması ile yakıtların özgül yakıt tüketimleri arasındaki fark azalmaktadır. Bunun sebebi birim zamanda tüketilen yakıt miktarının, motor yükünün azalmasıyla birlikte azalmasıdır. Yakıt miktarı azaldıkça tüketim oranlarında azalma meydana gelmiştir.

#### 5.4.1.2. Termik verimin karşılaştırılması

60, 40 ve 20 Nm sabit yük ve devir şartlarında elde edilen termik verim eğilimleri birbirine benzemektedir. Motor yükü azaldıkça termik verimde azalma olmuştur. 20 Nm sabit yük şartlarında termik verim %16–19 arasında değişim göstermiştir. Şekil 5.75’de test yakıtları için termik verimin motor devri ile değişimi gösterilmektedir. 60, 40 Nm sabit yüklerde olduğu gibi 20 Nm sabit yükte de maksimum termik verim özgül yakıt tüketiminin minimum olduğu 2000 d/d’da elde edilmiştir. 20 Nm sabit yük testlerinde, ortalama olarak B100 ve B50 kullanımı ile termik verimde, PKDY göre %1,20 ve %0,37 artış olurken, B5 kullanımıyla %0,07 azalma olmuştur. 20 Nm sabit yük şartlarında PKDY ve B20’nin ortalama termik verimleri aynı çıkmıştır.

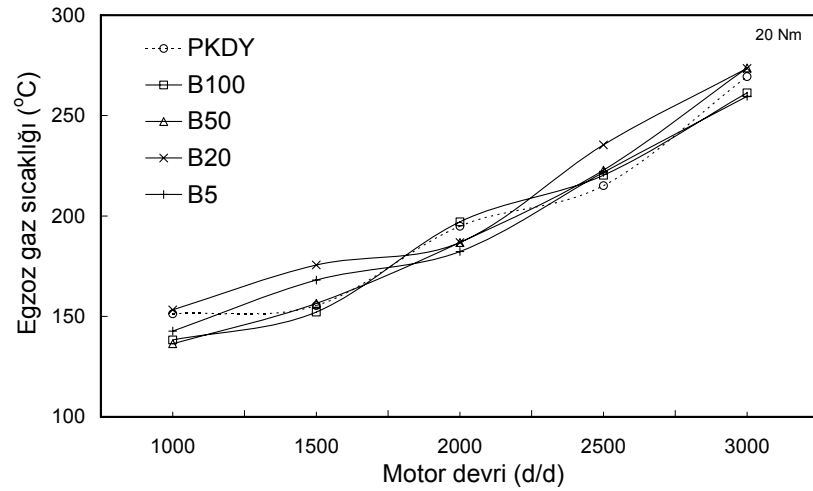


Şekil 5.75: 20 Nm sabit yük ve değişik devirlerde termik verimin değişimi

#### 5.4.1.3. Egzoz gazı sıcaklıklarının karşılaştırılması

40 Nm sabit yük şartlarına göre 20 Nm sabit yükte egzoz sıcaklığı azalmıştır. Şekil 5.76’da 20 Nm sabit yük ve değişik devirlerde egzoz gaz sıcaklıklarının değişimi

gösterilmektedir. 20 Nm sabit yük şartlarında, tam yük, 60 ve 40 Nm sabit yük şartlarında olduğu gibi maksimum egzoz sıcaklığı 3000 d/d'da belirlenmiştir. 20 Nm sabit yükte, 3000 d/d'daki egzoz sıcaklığı PKDY için 269,4°C, B5 için 259,6°C, B20 için 273,5°C, B50 için 273,7°C, B100 için 261,3°C olarak ölçülmüştür. 3000 d/d'da yakıtların sıcaklıkları arasındaki fark 40 Nm sabit yükte olduğu gibi 15°C'nin altındadır. Bir dizel motorda motor yükü azaldıkça hava-yakıt oranı oldukça artmaktadır. Bu durum egzoz sıcaklığının azalmasına neden olmaktadır. 20 Nm sabit yükte 1000 d/d'da yakıtların sıcaklıkları arasındaki fark 20°C'nin altındadır. 1000 d/d'da minimum egzoz sıcaklığı B50 için 136,4°C olarak ölçülmüştür. Diğer sabit yüklerde olduğu gibi 20 Nm sabit yükte de kontrollü yanmayı erken tamamlayan yakıtlarda egzoz sıcaklığı genelde en düşük seviyede çıkmıştır.



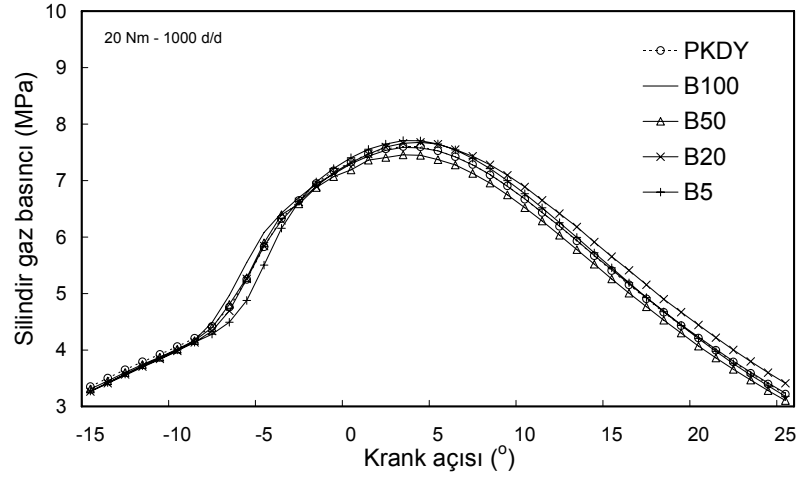
Şekil 5.76: 20 Nm sabit yük ve değişik devirlerde egzoz gaz sıcaklıklarının değişimi

## 5.4.2. Yanma ve püskürtme karakterlerinin karşılaştırılması

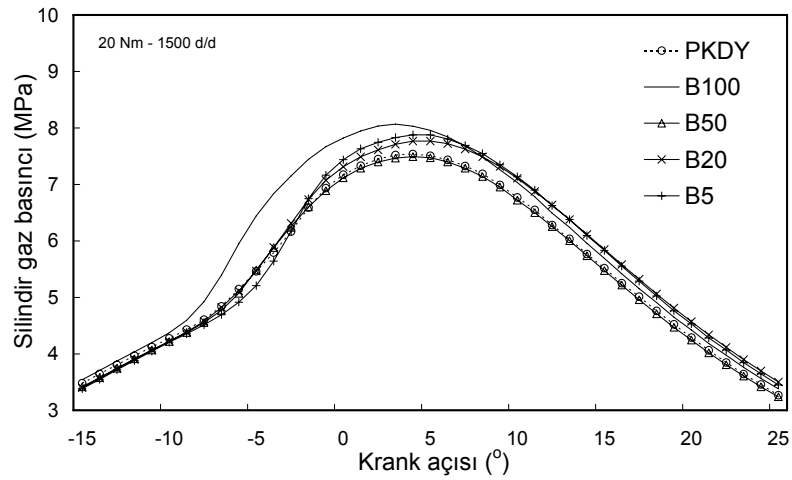
### 5.4.2.1. Silindir gaz basınçlarının karşılaştırılması

Tam yük, 60, 40 ve 20 Nm sabit yük aynı devir şartlarındaki silindir gaz basınçları incelendiğinde motor yükü azaldıkça maksimum silindir gaz basıncının azaldığı gözlenmiştir. Ayrıca, motor yükü azaldıkça aynı yük ve devir için yakıtların maksimum silindir gaz basınçlarının elde edildiği noktalar birbirine çok benzemektedir. Şekil 5.77, 5.78, 5.79, 5.80, 5.81'de 20 Nm sabit yük ve değişik devirlerde silindir gaz basıncının KA'ya göre değişimi gösterilmektedir. 20 Nm sabit

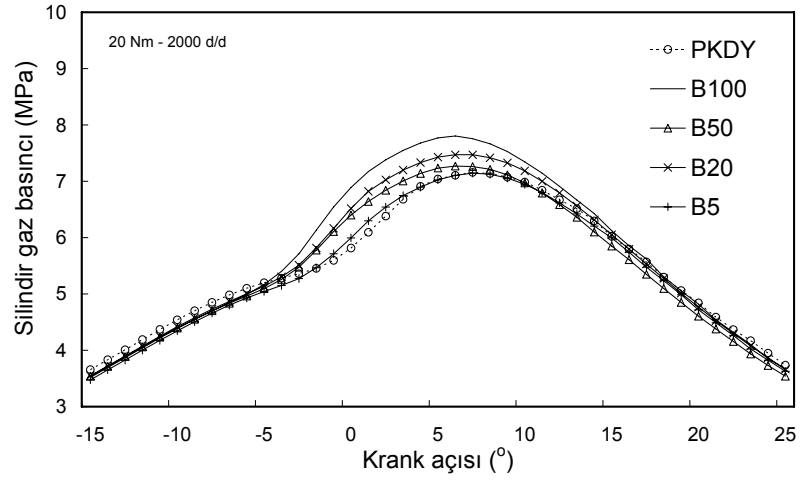
yük ve devir şartlarında maksimum silindir gaz basıncı B100 ve B5 kullanımı ile elde edilmiştir. 1000 d/d'da B5, 1500, 2000, 2500 ve 3000 d/d' B100'ün silindir gaz basıncı en yüksek seviyededir. 60 ve 40 Nm olduğu gibi 1000, 1500, 2000 d/d'da maksimum silindir gaz basıncı KA cinsinden çok kısa bir süre kalırken, 2500 ve 3000 d/d'da yaklaşık 7° KA maksimum silindir gaz basıncı tepesinin genişlediği gözükmektedir. Motor yükü azaldıkça aynı devir için yakıtların maksimum silindir basınçları arasındaki fark çok hafif azalmaktadır. 20 Nm sabit yük şartlarında, tüm motor devirleri için maksimum silindir gaz basıncı 3,5° ile 6° KA arasında gerçekleşmiştir.



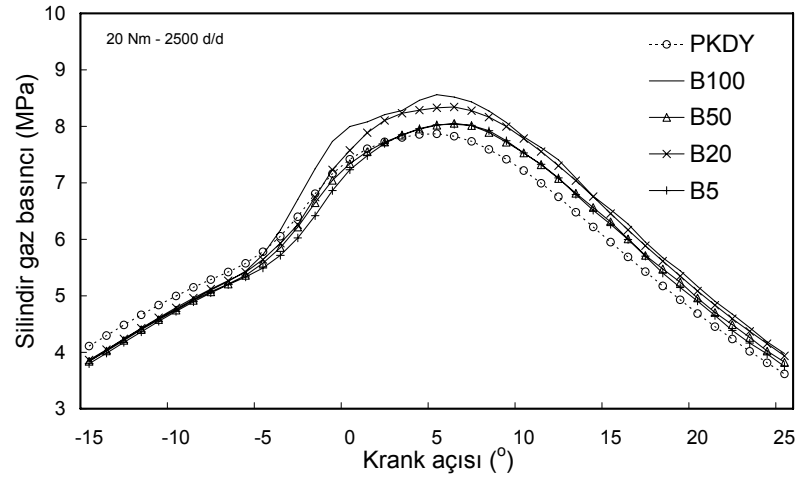
Şekil 5.77: 20 Nm sabit yük ve 1000 d/d'da silindir gaz basıncının KA'ya göre değişimi



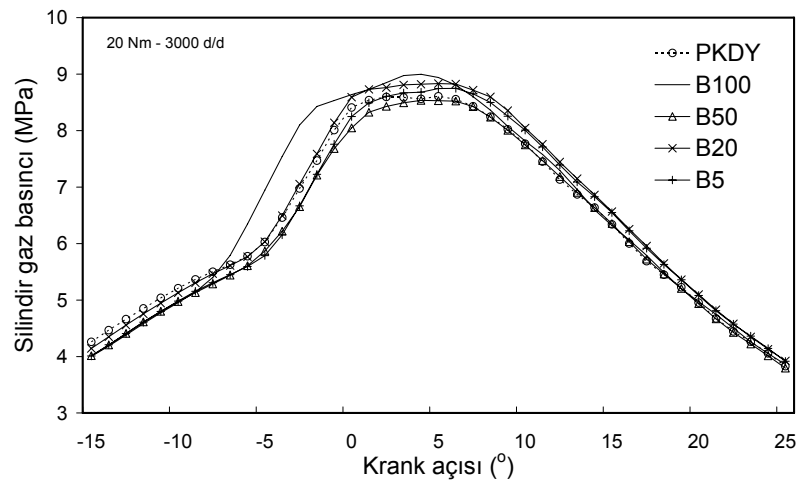
Şekil 5.78: 20 Nm sabit yük ve 1500 d/d'da silindir gaz basıncının KA'ya göre değişimi



Şekil 5.79: 20 Nm sabit yük ve 2000 d/d’da silindir gaz basıncının KA’ya göre değişimi



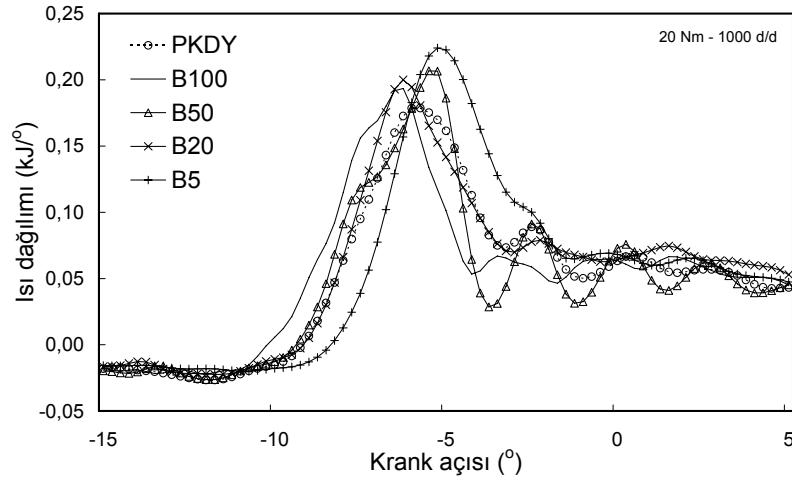
Şekil 5.80: 20 Nm sabit yük ve 2500 d/d’da silindir gaz basıncının KA’ya göre değişimi



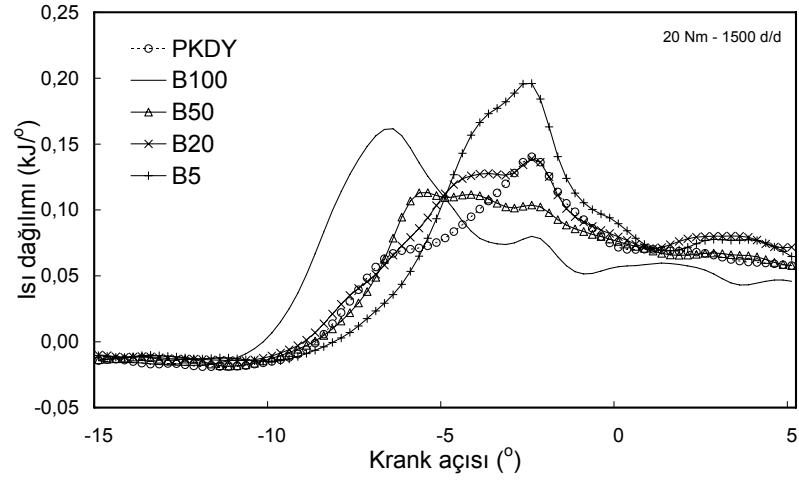
Şekil 5.81: 20 Nm sabit yük ve 3000 d/d’da silindir gaz basıncının KA’ya göre değişimi

#### 5.4.2.2. Isı dağılımlarının karşılaştırılması

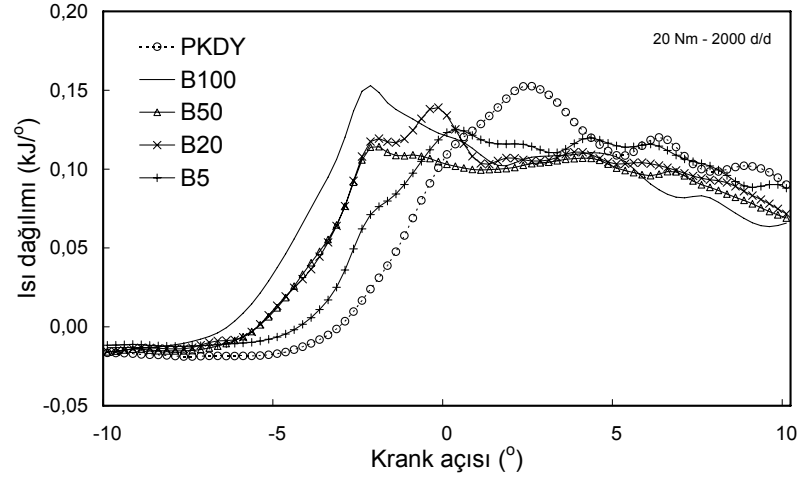
20 Nm sabit yük ve tüm devirlerde B100, B50 ve B20'nin ısı dağılımı B5 ve PKDY'ya göre daha erken başlamıştır. Bu duruma, B100, B50 ve B20'nin püskürtme başlangıçlarının PKDY ve B5 göre daha erken başlaması neden olmuştur. Şekil 5.82, 5.83, 5.84, 5.85, 5.86'da 20 Nm sabit yük ve değişik devirlerde ısı dağılımının KA'ya göre değişimi gösterilmektedir. 20 Nm sabit yük şartlarında 1000, 1500, 3000 d/d'da B5, 2000, 2500 d/d'da B100 maksimum ısı dağılım tepe noktasını göstermiştir. Tam yük, 60 ve 40 Nm sabit yük şartlarında olduğu gibi 20 Nm sabit yükte de tüm yakıtların ani ısı dağılımları altında kalan alanlar kesişmektedir. 20 Nm sabit yük testinde B100'ün ısı dağılımı maksimum noktaya ulaştıktan sonra ani düşme eğilimi göstermiştir. Krank açısı cinsinden bakıldığında ise tüm yakıtlar aynı mesafede ani yanma periyodunu tamamlamıştır. Motor yükü azaldıkça birim zamandaki yakıt tüketimlerin birbirine yaklaşması ani yanma periyodunun aynı KA'nda gerçekleşmesinde etkili olduğu düşünülmüştür.



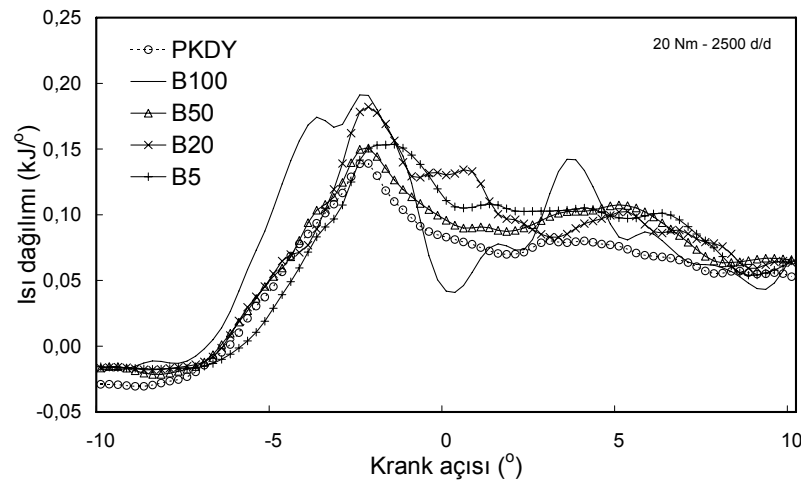
Şekil 5.82: 20 Nm sabit yük ve 1000 d/d'da ısı dağılımının KA'ya göre değişimi



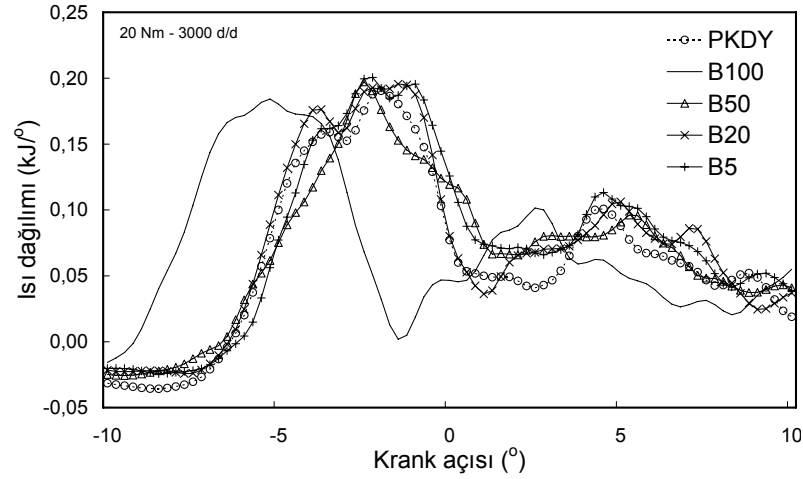
Şekil 5.83: 20 Nm sabit yük ve 1500 d/d'da ısı dağılımının KA'ya göre değişimi



Şekil 5.84: 20 Nm sabit yük ve 2000 d/d'da ısı dağılımının KA'ya göre değişimi



Şekil 5.85: 20 Nm sabit yük ve 2500 d/d'da ısı dağılımının KA'ya göre değişimi

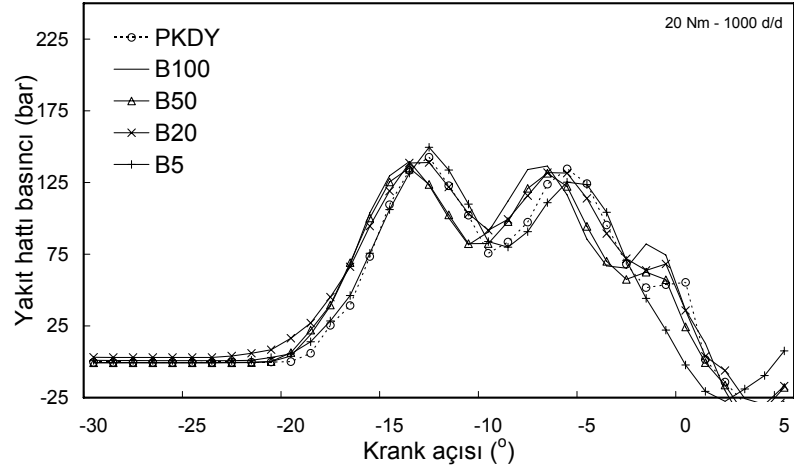


Şekil 5.86: 20 Nm sabit yük ve 3000 d/d'da ısı dağılımının KA'ya göre değişimi

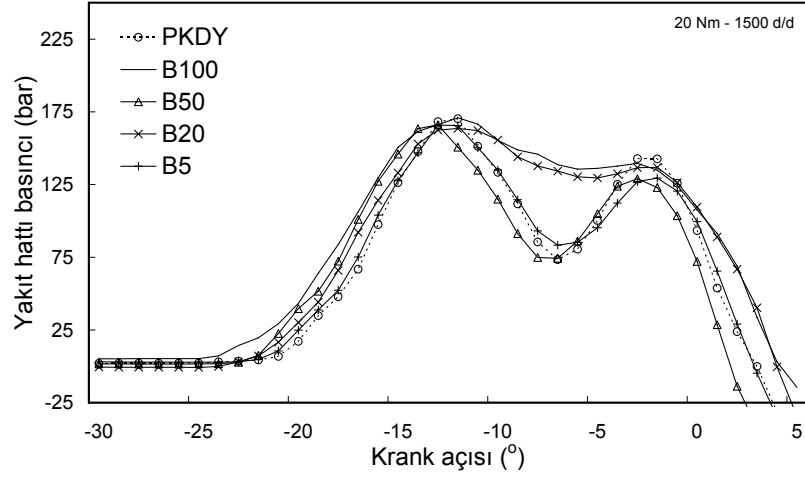
#### 5.4.2.3. Yakıt hattı basınçlarının ve tutuşma gecikmesinin karşılaştırılması

40 ve 60 Nm sabit yük şartlarında olduğu gibi 20 Nm sabit yük şartlarında da yakıtların maksimum yakıt hattı basınçları ve püskürtme eğilimleri genelde birbirine benzer çıkmıştır. Şekil 5.87, 5.88, 5.89, 5.90, 5.91'de 20 Nm sabit yük ve değişik devirlerde yakıt hattı basıncının KA'ya göre değişimi gösterilmektedir. Tüm testlerde olduğu gibi 20 Nm sabit yük testlerinde de biyodizelin püskürtme başlangıcı PKDY'a göre erken başlamıştır. Biyodizelin kullanılması ile püskürtme başlangıcı PKDY göre 1000, 1500, 2000, 2500, 3000 d/d'da sırasıyla 0,85°, 1,14°, 1,35°, 1,07°, 1,22 °KA daha erken olmuştur. 40 Nm'ye göre 20 sabit yük şartlarında, birim zamanda püskürtülen yakıt miktarı azaldığından, püskürtme başlangıçları 1–1,5° KA ÜÖN'ya yaklaşmıştır. Ayrıca, 20 Nm sabit yük şartlarında püskürtme süresi KA cinsinden 40 Nm şartlarına göre azalmıştır. Tam, 60 ve 40 Nm şartlarında olduğu gibi 20 Nm sabit yük şartlarında da tüm yakıtlar için motor devri arttıkça püskürtme süresi KA cinsinden artmıştır.

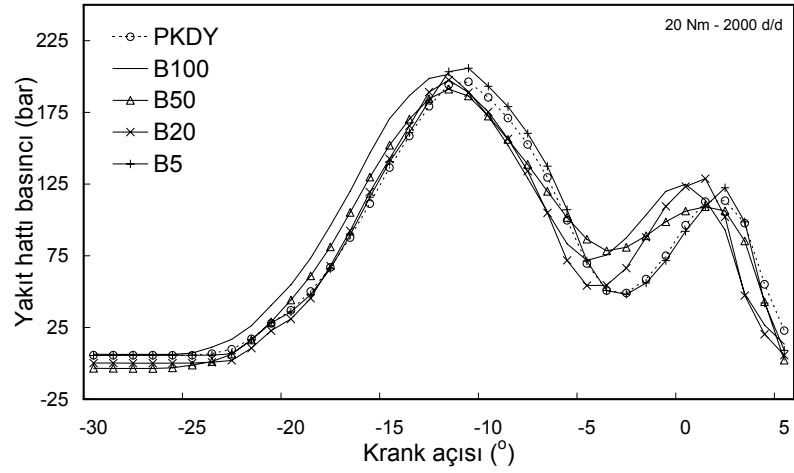




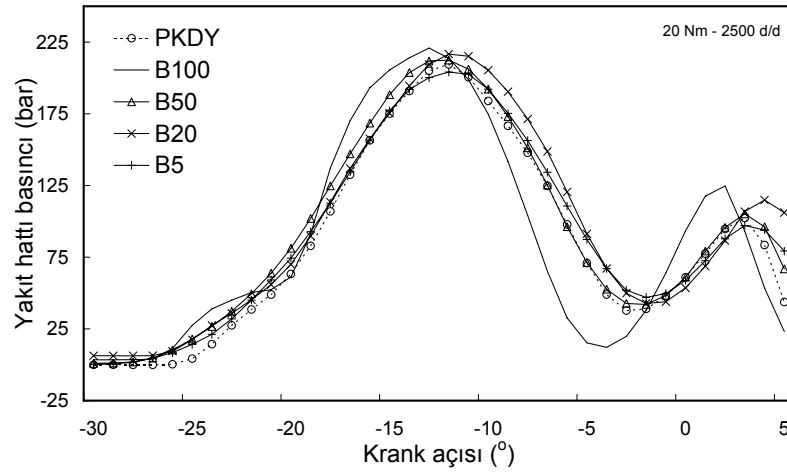
Şekil 5.87: 20 Nm sabit yük ve 1000 d/d'da yakıt hattı basıncının KA'ya göre değişimi



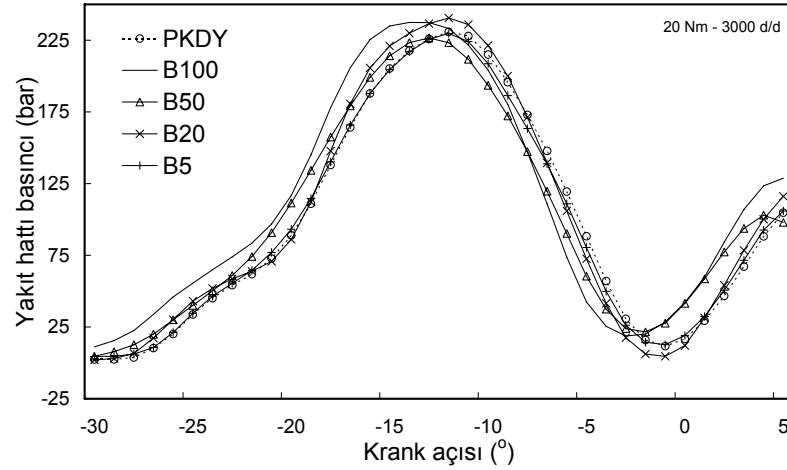
Şekil 5.88: 20 Nm sabit yük ve 1500 d/d'da yakıt hattı basıncının KA'ya göre değişimi



Şekil 5.89: 20 Nm sabit yük ve 2000 d/d'da yakıt hattı basıncının KA'ya göre değişimi



Şekil 5.90: 20 Nm sabit yük ve 2500 d/d'da yakıt hattı basıncının KA'ya göre değişimi



Şekil 5.91: 20 Nm sabit yük ve 3000 d/d'da yakıt hattı basıncının KA'ya göre değişimi

20 Nm sabit yük şartlarında hava fazlalığının çok yüksek olması tam yük, 60 ve 40 Nm sabit yük şartlarına göre 20 Nm sabit yükte daha kompleks bir tutuşma gecikmesi tablosunun oluşmasına neden olmuştur. Daha öncede ifade edildiği gibi biyodizelin setan sayısı ve oksijen içeriği biyodizel ve karışımlarının PKDY'a göre tutuşma gecikmesini kısalmaktadır. 20 Nm sabit yük şartlarında, hava fazlalığının yüksek olması 1000 ve 1500 devirlerinde B100 hariç, karışımların tutuşma gecikmesinin uzamasına neden olmuştur. Motor devri arttıkça silindir içerisindeki artık egzoz gazı yüzdesi arttığından tutuşma gecikmesi süreleri tam, 60 ve 40 Nm yüklerindeki tutuşma gecikmesi tablolarına benzer hale gelmiştir. Biyodizel tutuşma gecikmesi, diğer yüklerde olduğu gibi 20 Nm sabit yükte de PKDY göre KA cinsinden daha kısadır. Biyodizel ile PKDY arasında maksimum fark 2000, 2500 ve

3000 d/d'da, sırasıyla 1,65°, 1,93°, 1,28° KA çıkmıştır. Ayrıca, 20 Nm sabit yükte B50 ile PKDY arasındaki tutuşma gecikmesi farkı 2000, 2500 ve 3000 d/d'da belirgin bir şekilde artmıştır. B50 ile PKDY arasında 2000, 2500 ve 3000 d/d'da, tutuşma gecikmesi farkı sırasıyla 1,77°, 1,34°, 0,61° KA çıkmıştır. Tablo 5.19, 5.20, 5.21, 5.22, 5.23'de 20 Nm sabit yük ve değişik devirlerde püskürtme ve ısı dağılımı başlangıçları, tutuşma gecikmesi süresi KA cinsinden verilmektedir.

Tablo 5.19: 20 Nm sabit yük ve 1000 d/d'da tutuşma gecikmesi

1000 d/d				
Yakıt	PB(°)	IDB (°)	TG (°)	TGS (sn)
PKDY	14,13	9,75	4,38	0,000730
B100	14,98	11,00	3,98	0,000663
B50	14,76	10,25	4,51	0,000752
B20	14,46	9,75	4,71	0,000785
B5	14,06	9,50	4,56	0,000760

PB -Püskürtme Başlangıcı, IDB -Isı Dağılımı Başlangıcı,  
TG -Tutuşma Gecikmesi, TGS -Tutuşma Gecikmesi Süresi

Tablo 5.20: 20 Nm sabit yük ve 1500 d/d'da tutuşma gecikmesi

1500 d/d				
Yakıt	PB(°)	IDB (°)	TG (°)	TGS (sn)
PKDY	14,84	10,25	4,59	0,000510
B100	15,98	11,75	4,23	0,000470
B50	15,86	11,00	4,86	0,000540
B20	15,15	10,75	4,40	0,000489
B5	14,87	10,00	4,87	0,000541

Tablo 5.21: 20 Nm sabit yük ve 2000 d/d'da tutuşma gecikmesi

2000 d/d				
Yakıt	PB(°)	IDB (°)	TG (°)	TGS (sn)
PKDY	15,25	5,75	9,50	0,000792
B100	16,60	8,75	7,85	0,000654
B50	15,98	8,25	7,73	0,000644
B20	15,56	7,75	7,81	0,000651
B5	15,45	6,00	9,45	0,000788

Tablo 5.22: 20 Nm sabit yük ve 2500 d/d'da tutuşma gecikmesi

2500 d/d				
Yakıt	PB(°)	IDB (°)	TG (°)	TGS (sn)
PKDY	17,09	7,50	9,59	0,000639
B100	18,16	10,50	7,66	0,000511
B50	17,75	9,50	8,25	0,000550
B20	17,30	7,75	9,55	0,000637
B5	17,20	7,75	9,45	0,000630

Tablo 5.23: 20 Nm sabit yük ve 3000 d/d'da tutuşma gecikmesi

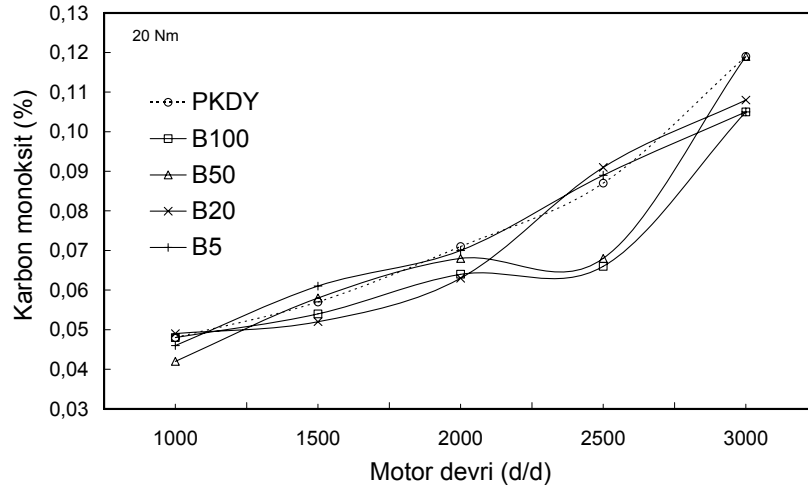
3000 d/d				
Yakıt	PB(°)	IDB (°)	TG (°)	TGS (sn)
PKDY	18,28	8,00	10,28	0,000571
B100	19,50	10,50	9,00	0,000500
B50	19,17	9,50	9,67	0,000537
B20	18,47	7,50	10,97	0,000609
B5	18,39	7,50	10,89	0,000605

### 5.4.3. Egzoz emisyon karakterlerinin karşılaştırılması

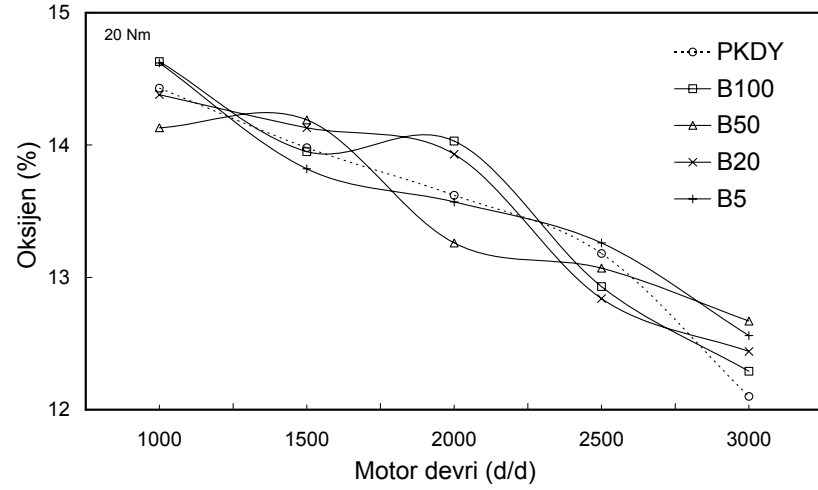
#### 5.4.3.1. CO emisyonlarının karşılaştırılması

20 Nm sabit yük şartlarında tüm yakıtlar için CO emisyonu oldukça düşük seviyede çıkmıştır. Tam yükten, 60, 40, 20 Nm sabit yüke doğru gidildikçe CO emisyonunda önemli azalmalar görülmüştür. Dizel motorların hava fazlalığı ile çalışması ve motor yükü azaldıkça hava-yakıt oranının büyümesi bu oluşumu meydana getirmiştir. Daha öncede ifade edildiği gibi yakıt özellikleri ve motor yükü, hava-yakıt oranını önemli derecede etkilediğinden, CO oluşumu bu parametrelerin bir fonksiyonu olarak değişmektedir. Tam yükten, 20 Nm sabit yüke inildikçe biyodizelin karışımdaki yüzdesi ile orantılı olarak CO emisyonunda azalmalar görülmüştür. Bu durum, biyodizel ve karışımlarının kullanımı ile birim zamanda tüketilen yakıt miktarının PKDY'a göre daha fazla olmasına rağmen gerçekleşmiştir. Biyodizel ve karışımlarının kullanılması ile CO emisyonundaki azalmanın temel nedeni biyodizelin içeriğindeki oksijendir. Tam yük, 60 ve 40 Nm sabit yükte olduğu gibi, 20 Nm sabit yük şartlarında da tüm yakıtlar için maksimum CO emisyonu 3000

d/d'da ölçülmüştür. Bu durum, motor devri yükseldikçe volumetrik verimin azalması ve silindir içerisinde artık egzoz gazı yüzdesinin artması ile ilişkilendirilmiştir. Şekil 5.92'de 20 Nm sabit yük ve değişik devirlerde karbon monoksit yüzdesinin değişimi gösterilmektedir. 20 Nm sabit yükte CO emisyonundaki değişim ile hava-yakıt oranındaki değişim arasındaki paralellik açıkça görülmektedir. Tablo 5.24'de 20 Nm sabit yükte motor devrine göre hava-yakıt oranlarının değişimi verilmektedir. 20 Nm sabit yük şartlarında tüm yakıtlar için ölçülen CO emisyonu çok küçük bir aralıkta değişmektedir. 20 Nm sabit yük şartlarında, B100, B50, B20 ve B5 kullanımı ile ölçülen CO emisyonu, PKDY kullanımına göre ortalama olarak azalma göstermiştir. B100, B50, B20 ve B5 kullanımıyla CO emisyonunda PKDY'ya göre ortalama olarak, sırasıyla %11,78, %7,07, %4,97 ve %2,88 azalma görülmüştür. Ayrıca, 20 Nm sabit yük şartlarında hava fazlalığının yüksek olması tüm yakıtlar için egzozdan salınan oksijen konsantrasyonunu önemli bir şekilde artırmıştır. Şekil 5.93'de 20 Nm sabit yük ve değişik devirlerde oksijen yüzdesinin değişimi gösterilmektedir.



Şekil 5.92: 20 Nm sabit yük ve değişik devirlerde CO emisyonunun değişimi



Şekil 5.93: 20 Nm sabit yük ve değişik devirlerde O<sub>2</sub> yüzdesinin değişimi

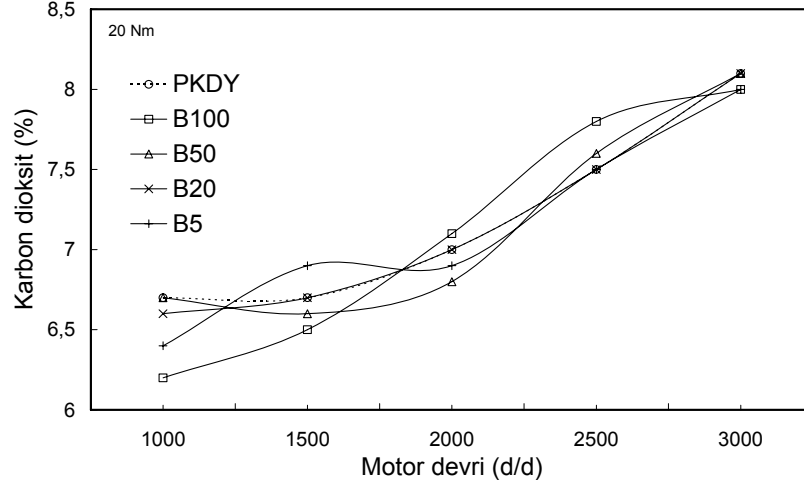
Tablo 5.24: 20 Nm sabit yükte motor devrine göre hava-yakıt oranları

Yakıt	1000	1500	2000	2500	3000
PKDY	48,71	45,10	50,91	46,69	42,8
B100	49,48	43,92	49,07	46,65	42,09
B50	47,04	43,01	48,57	44,89	41,40
B20	48,07	44,22	49,88	47,57	42,43
B5	48,49	44,65	50,63	47,11	42,68

#### 5.4.3.2. CO<sub>2</sub> emisyonlarının karşılaştırılması

40 Nm sabit yükte CO<sub>2</sub> konsantrasyonu %7,6–10 arasında seyrederken, 20 Nm sabit yükte %6,2–8,1 arasında değişim göstermiştir. Tam yükten, 20 Nm sabit yüke inildikçe CO<sub>2</sub> konsantrasyonu yaklaşık olarak 2 kat azalmıştır. Tüm motor testlerinde CO<sub>2</sub> emisyonunda biyodizel ve karışımlarının kullanımı ile PKDY’ya göre belirli bir eğilimde artma veya azalma olmamıştır. Şekil 5.94’de 20 Nm sabit yük ve değişik devir ile karbon dioksit yüzdesinin değişimi gösterilmektedir. 20 Nm sabit yük şartlarında, ortalama olarak B100, B50, B20 ve B5 kullanımıyla CO<sub>2</sub> emisyonunda sırasıyla %1,11, %0,56, %0,28 ve %0,83 PKDY’ya kıyasla azalma görülmüştür. 1000, 1500, 3000 d/d’da biyodizel kullanımı ile PKDY’ya kıyasla sırasıyla %7,5, %3, %1,2 azalma görülürken, 2000 ve 2500 d/d’da %1,4 ve %4 artış olmuştur. Ayrıca, 60 Nm ve 40 Nm sabit yük şartlarında olduğu gibi, 20 Nm sabit yük şartlarında da tüm

yakıtlar birbirine benzer eğilimlerde CO<sub>2</sub> emisyonu üretmişlerdir. Ayrıca, her yakıt motor devrinin artışı ile artan miktarda CO<sub>2</sub> emisyonu üretmiştir.

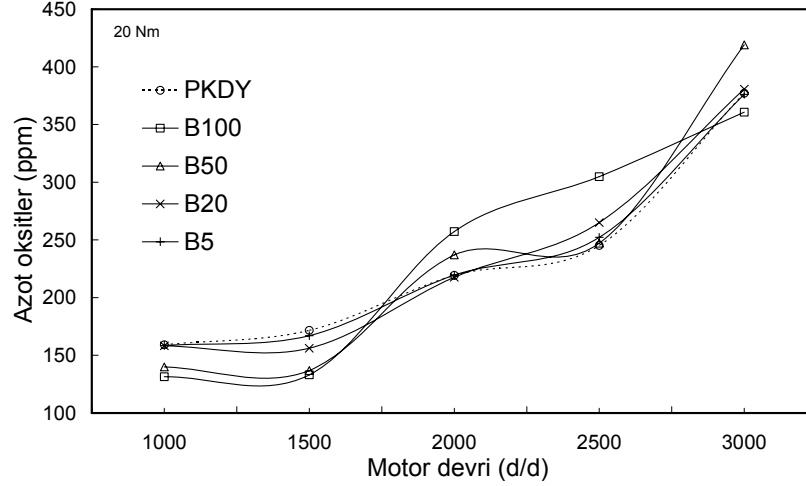


Şekil 5.94: 20 Nm sabit yük ve değişik devirlerde CO<sub>2</sub> emisyonunun değişimi

#### 5.4.3.3. NO<sub>x</sub> emisyonlarının karşılaştırılması

20 Nm sabit yükte hava-yakıt oranının oldukça yüksek olması NO<sub>x</sub> oluşumunu önemli derecede artırmıştır. 60 ve 40 Nm sabit yük şartlarında olduğu gibi, 20 Nm sabit yük şartlarında da tüm yakıtlar için NO<sub>x</sub> oluşumu belirli bir eğilimde gerçekleşmiştir. Şekil 5.95’de 20 Nm sabit yük ve değişik devirde düzeltme faktörü ile çarpılarak elde edilen azot oksitlerin değişimi gösterilmektedir. 20 Nm sabit yük şartlarında, B20, B5 ve PKDY tüm devirlerde birbirlerine benzer NO<sub>x</sub> oluşumu göstermişlerdir. 1000 d/d’da B100 ve B50’nin püskürtme başlangıcı PKDY göre 1,65° ve 1,77° KA daha erken olmuş ve genişleme zamanını daha erken tamamlamışlardır. Bu durum 1000 d/d’da B100 ve B50’nin PKDY göre NO<sub>x</sub> oluşumunu azaltmıştır. 2000 ve 2500 d/d’da B100’ün silindir gaz basıncının diğer yakıtlara göre daha geniş bir aralıkta ve daha yüksek basınçta kalması B100’ün bu devirlerde ısı NO<sub>x</sub> oluşumunu maksimum seviyeye çıkarmıştır. 3000 d/d’da B100’ün püskürtme başlangıcının PKDY’ya göre daha erken olması ve her iki yakıtında genişleme zamanlarının aynı olması bu devirde B100’ün NO<sub>x</sub> oluşumunu PKDY’ya göre azaltmıştır. 20 Nm sabit yük şartlarında ortalama olarak, B100, B50, B20 ve B5 kullanımıyla ölçülen NO<sub>x</sub> emisyonu sırasıyla %1,26 %0,64, %0,44 ve

%0,08 PKDY'ya kıyasla artmıştır. Bu oranlar, tam, 60, 40 Nm yüklerle karşılaştırıldığında oldukça küçük kalmaktadır.

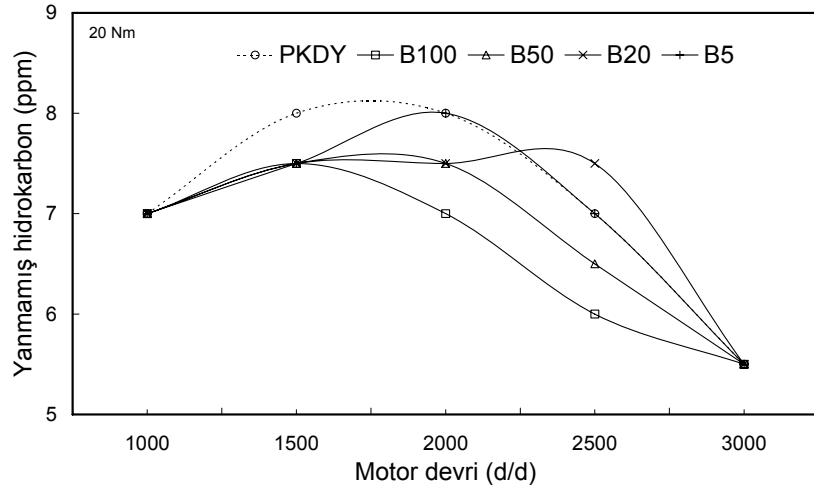


Şekil 5.95: 20 Nm sabit yük ve değişik devir ile azot oksitlerin (NO<sub>x</sub>) değişimi

#### 5.4.3.4. HC emisyonlarının karşılaştırılması

20 Nm şartlarında hava-yakıt oranının çok yüksek olması yanmamış HC seviyesinin her devir için 5,5–8 ppm gibi çok dar bir aralıkta seyretmesine neden olmuştur. Daha öncede ifade edildiği gibi bu seviyede yanmamış HC emisyonu içten yanmalı motorlar için çok düşüktür. Bu duruma ön yanma odalı dizel motorlardaki karışım oluşumunun homojen bir yapıda olması ve testlerde kullanılan dizel motorunun sıkıştırma oranının çok yüksek olması etkili olmuş olabilir. Şekil 5.96'da 20 Nm sabit yük ve değişik devirlerde yanmamış HC emisyonunun değişimi gösterilmektedir. Tam yük, 60 ve 40 Nm sabit yük şartlarında olduğu gibi, 20 Nm sabit yük şartlarında da tüm devirlerde biyodizel ve karışımlarının kullanılmasıyla elde edilen yanmamış HC emisyonu PKDY göre daha düşük seviyede çıkmıştır. Ortalama olarak, B100, B50, B20 ve B5 kullanımı ile yanmamış HC emisyonunda PKDY'ya kıyasla sırasıyla %7,04, %4,23, %1,41 ve %1,41 azalma olmuştur.

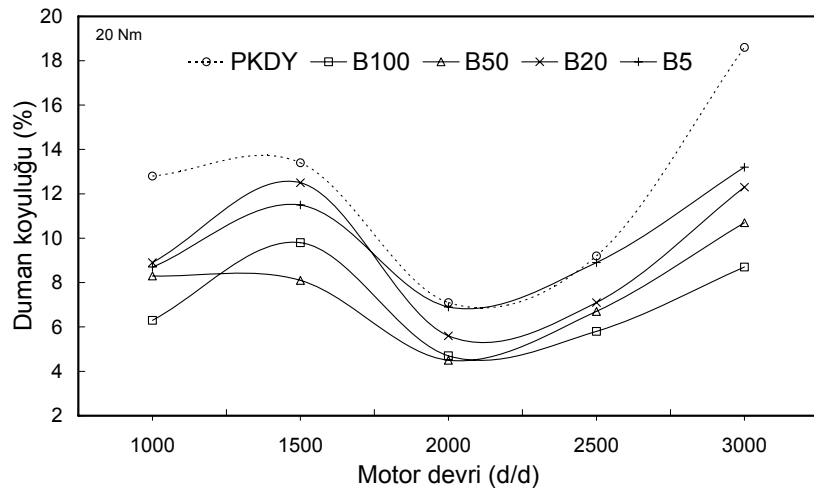




Şekil 5.96: 20 Nm sabit yük ve değişik devirlerde yanmamış HC değişimi

#### 5.4.3.5. Duman koyuluğunun karşılaştırılması

Tam yük, 60 ve 40 Nm sabit yük şartlarında olduğu gibi, 20 Nm sabit yük şartlarında da tüm devirlerde biyodizel ve karışımlarının kullanılmasıyla elde edilen duman koyuluğu PKDY'ya göre daha düşük seviyede çıkmıştır. Şekil 5.97'de 20 Nm sabit yük ve değişik devirlerde duman koyuluğu değişimi gösterilmektedir. Ortalama olarak, B100, B50, B20 ve B5 kullanımı ile duman koyuluğunda PKDY'ya göre sırasıyla %42,23, %37,32, %24,06 ve %19,48 azalma olmuştur. 20 Nm şartlarında hava-yakıt oranının çok yüksek olmasına rağmen bu oranların elde edilmesi biyodizelin hemen hemen hiç aromatik bileşik içermemesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.97: 20 Nm sabit yük ve değişik devirlerde duman koyuluğunun değişimi

## 5.5. Sonuç ve Değerlendirme

Tam yük, 60, 40, 20 Nm sabit yük ve değişik devirlerde PKDY, B100, B50, B20 ve B5 kullanılarak ön yanma odalı bir dizel motorda yapılan testlerde, özet olarak aşağıda maddeler halinde belirtilen sonuçlar elde edilmiştir.

1. Tam yük şartlarında biyodizel ve karışımlarının kullanımı ile motor performansında hafif bir düşme meydana gelmiştir. Karışım içerisinde biyodizelin artan yüzdesi ile birlikte döndürme momentinde azalma olmuştur. Ortalama olarak B100, B50, B20, B5, kullanımı ile döndürme momentinde, sırasıyla %7,16, %5,6, %4,28, %2,01 PKDY'a göre azalma meydana gelmiştir. Tam yük, 60, 40, 20 Nm sabit yük ve değişik devirlerde yapılan tüm testlerde maksimum döndürme momenti ve minimum özgül yakıt tüketimi 2000 d/d'da elde edilmiştir.
2. Tam yük, 60, 40, 20 Nm sabit yük ve değişik devirlerde yapılan tüm testlerde biyodizelin ve karışımlarının özgül yakıt tüketimi, PKDY'a göre daha yüksek çıkmıştır. Biyodizelin karışım içerisindeki yüzdesi ile ilişkili olarak özgül yakıt tüketiminde artış belirlenmiştir. B100'den sonra sırasıyla B50, B20, B5'in özgül yakıt tüketimi PKDY'a göre daha yüksektir. Biyodizel ve karışımlarının özgül yakıt tüketiminin yüksek olmasının temel nedeni biyodizelin enerji içeriğinin PKDY'a göre daha düşük olmasıdır. Bu çalışmada, biyodizelin ısı değeri PKDY'a göre %9,78 daha düşüktür. Ayrıca, biyodizelin yoğunluğunun PKDY'a göre daha yüksek olması hacimsel olarak püskürtülen yakıt miktarının kütleli olarak daha fazla çıkmasına neden olmuştur.
3. Tam yük, 60, 40, 20 Nm sabit yük ve değişik devirlerde yapılan tüm testlerde, tüm yakıtlar için maksimum yakıt tüketimi düşük motor hızlarında ölçülmüştür. Motor gücü, hız ile doğru orantılı olarak arttığı için, motor devrinin 1000 d/d olduğu durumda birim güç başına tüketilen yakıt miktarı diğer devirlere göre daha fazla olmuştur. Ayrıca, düşük motor hızlarında döngüsel hava hareketlerinin yavaş olması, biyodizelin PKDY'a göre daha yüksek kaynama noktasına sahip olması, atomizasyon oranının düşük olması, motorun hareketli parçalarındaki atalet ve sürtünme kuvvetlerinin fazla olması özgül yakıt tüketiminin artışıdaki diğer etkenlerdir.

4. Tam yük, 60, 40 ve 20 Nm'deki özgül yakıt tüketimi incelendiğinde, motor yükünün azalması ile birim güç başına tüketilen yakıt miktarında artış ortaya çıkmıştır. Maksimum özgül yakıt tüketimi B100 kullanımı ile 1000 d/d'da tam yük için 442,24 g/kW-saat, 60 Nm için 502,09 g/kW-saat, 40 Nm için 522,10 g/kW-saat, 20 Nm için 539,27 g/kW-saat olarak ölçülmüştür. Birim zamandaki g/s cinsinden yakıt tüketimi incelendiğinde ise motor yükünün azalması ile yakıt tüketimi azalmıştır. B100, B50, B20 ve B5'in özgül yakıt tüketiminin ortalama oranları incelendiğinde, motor yükünün azalması ile yakıtların özgül yakıt tüketimleri arasındaki fark azalmıştır. Bunun sebebi, birim zamanda tüketilen yakıt miktarının, motor yükünün azalmasıyla birlikte azalmasıdır.
5. Tam yük ve değişken hız şartlarında efektif güç, karışımda artan biyodizel yüzdesi ile azalma göstermiştir. Tam yük şartlarında biyodizel yüzdesi ile motor gücündeki azalmanın temel nedeni, artan biyodizel yüzdesi ile elde edilen döndürme momentinin düşmesidir. Maksimum efektif güç 3000 d/d da, PKDY için 26,88 kW, B5 için 26,58 kW, B20 için 26,05 kW, B50 için 25,84 kW, B100 için 25,21 kW olarak hesaplanmıştır.
6. Tam yük şartlarında, biyodizel ve karışımlarının kullanılması ile termik verimde azalma olurken, sabit yük şartlarında B100 ve B50'in termik verimi PKDY göre daha yüksek çıkmıştır. Tam yük şartlarında biyodizel ve karışımlarının kullanılması ile termik verimdeki azalmanın nedeni, efektif işin azalması, özgül yakıt tüketiminin artması ve biyodizelin enerji içeriğinin PKDY'a göre daha az olmasıdır. Tüm yakıtlar için maksimum termik verim özgül yakıt tüketiminin minimum olduğu 2000 d/d'da elde edilmiştir. Motor yükü azaldıkça termik verimde azalma olmuştur.
7. Tüm testlerde elde edilen egzoz gazı sıcaklığı, yüksek devirli, doğal emişli ön yanma odalı bir dizel motor için normal bir seyir izlemiştir. Genelde, ön yanma odalı dizel motorlar aynı silindir hacmine sahip DP dizel motorlara göre daha yüksek egzoz sıcaklığı gösterebilmektedir. Biyodizel ve karışımlarının kullanımı ile egzoz gaz sıcaklığında azalma gözlemlenmiştir. Bu durumun temel nedeni, biyodizelin ve karışımlarının PKDY'a göre püskürtme başlangıcının daha erken olmasıdır. Püskürtme başlangıcı geliştikçe ısı dağılımında yükselme daha erken olduğu için silindir sıcaklığında soğuma daha erken başlayabilmektedir. Tam yük şartlarında, egzoz gazı sıcaklığının düşmesinde diğer önemli etken biyodizel ve

karışımlarının kullanılması ile PKDY'a göre maksimum yükün farklı değerlerde elde edilmesidir. Motor yükünün azalması ile birlikte egzoz sıcaklığı önemli derecede azalmıştır. Bu duruma neden olan en önemli etken, birim zamanda tüketilen yakıt miktarının azalmasıdır. Aynı zamanda, motor yükü azaldıkça yakıtların birim zamanda tüketimlerinin birbirine yaklaşması egzoz gaz sıcaklıklarının benzer eğilimler göstermesine neden olmuştur. Bir dizel motorda motor yükü azaldıkça hava-yakıt oranı oldukça artmaktadır. Bu durum egzoz sıcaklığının azalmasına neden olmaktadır.

8. Yapılan testlerde, genelde biyodizel kullanımı ile silindir gaz basıncının PKDY'a göre daha yüksek olduğu ve üst ölü noktaya biraz daha yaklaştığı ortaya çıkmıştır. Bu durum, biyodizelin yanma veya oksidasyonun PKDY göre erken başlamasından, biyodizelin püskürtme başlangıcının PKDY göre daha erken ve tutuşma gecikmesi süresinin daha kısa olmasından kaynaklanmıştır. Ayrıca, biyodizel ve karışımlarının kullanımı ile PKDY'a göre daha geniş maksimum silindir basınç tepesi meydana gelmiştir. Bu duruma, biyodizelin kaynama noktasının PKDY'a göre daha yüksek ve buharlaşma eğrisinin daha yatay seyretmesinden kaynaklandığı düşünülmüştür.
9. Tüm yakıtlar için silindir gaz basıncı motor devrinin artması ile artmıştır. Devir arttıkça silindir gaz basıncının daha yüksek olması; püskürtme başlangıcının daha erken, birim zamanda tüketilen yakıt miktarının daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, motor devri arttıkça silindir gaz basıncının yükselme noktası daha erken gerçekleşirken, silindir gaz basıncının genişleme noktaları üst ölü noktadan uzaklaşmıştır. Motor devri 2500, 3000 d/d'ya ulaştığında maksimum silindir basınç tepelerinin KA cinsinden 1000, 1500 ve 2000 devire göre daha geniş bir aralıkta basıncını sürdürdüğü görülmüştür. Bu durum, motor devri arttıkça silindir gaz basıncı altında kalan alanın büyüdüğünü göstermektedir. Tüm yakıtlar aynı yapıda silindir gaz basıncı eğrileri sergilemiştir. Tüm devirlerde, biyodizel ve karışımlarının PKDY benzer yanma eğrileri sergilemesi, biyodizelin PKDY'nin yerini alabilecek güçlü bir alternatif yakıt olduğunu göstermiştir.
10. Tüm test yakıtları için kontrollü yanma safhasında düzgün yanma karakteristikleri izlenmiştir. Bu durum, tüm yakıtların motorda benzer mekanik

yüklemeler oluşturduğunu göstermesi açısından önemlidir. Motor yükü azaldıkça yakıtların maksimum silindir gaz basınçları arasındaki fark küçülmüştür. Ayrıca, motor yükü azaldıkça aynı yük ve devir için yakıtların maksimum silindir gaz basınçlarının elde edildiği noktalar birbirine çok benzemektedir. Tüm testlerde biyodizel kullanıldığı zaman ısı dağılımı başlangıcı PKDY'a göre KA cinsinden daha erken başlamıştır. Bu sonuç, biyodizelin PKDY'a göre püskürtme başlangıcının daha erken ve tutuşma gecikmesi süresinin daha kısa olmasından kaynaklanmıştır.

11. Biyodizelin ısı dağılımı PKDY göre daha erken olmasına rağmen KA cinsinden tamamen farklı bir noktada ısı dağılımı alanı görülmemiştir. Biyodizel ve karışımlarının ısı dağılımındaki tepe noktalarının PKDY ile benzer KA aralığında gerçekleşmesi, maksimum silindir gaz basınçlarının benzer KA'da olmasına neden olmuştur. Testlerde, biyodizelin ani ısı dağılımındaki tepe noktası PKDY göre biraz daha geniş çıkmıştır. Bu durum, biyodizel kullanımı ile özgül yakıt tüketiminin artmasından ve biyodizelin buharlaşma eğrisinin PKDY göre daha yatay olmasından kaynaklanmıştır. Motor yükü azaldıkça yakıtların uçuculuğunun ısı dağılımı üzerine etkisi, biraz daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmıştır.
12. Tüm testlerde, biyodizel kullanımı ile püskürtme başlangıcı PKDY'a göre daha erken olmuştur. Biyodizel kullanımı ile püskürtme başlangıcının PKDY'a göre daha erken olması, biyodizelin PKDY'a göre viskozitesinin ve yoğunluğunun daha yüksek, sıkıştırılabilirliğinin ise daha az olmasından kaynaklanmıştır. B5'in püskürtme başlangıcı PKDY'a benzer çıkmıştır. Tüm yakıtlar için püskürtme süresi KA cinsinden devir arttıkça artmıştır. Ayrıca, püskürtme başlangıcı motor devri arttıkça her yakıt için üst ölü noktadan uzaklaşmıştır. Bu durum, motor devri arttıkça her yakıt için birim zamanda daha fazla yakıt püskürtülmesi gerekliliğinden kaynaklanmıştır.
13. Tüm testlerde B100, B50 ve B20, PKDY'a göre KA cinsinden daha kısa bir tutuşma gecikmesine sahiptir. Biyodizel kullanımı ile tutuşma gecikmesi süresinin kısalmasındaki temel etken, biyodizelin setan sayısının PKDY'a göre daha yüksek olmasıdır. Motor devrinin artmasıyla birim zamanda silindir içerisine alınan yakıt miktarı ve silindir gaz basıncı artmaktadır. Motor devri arttıkça KA cinsinden tutuşma gecikmesi süresi artmıştır. Tam yük ve 60, 40, 20

Nm sabit yük şartlarındaki maksimum tutuşma gecikmesi farkları incelendiğinde, motor yükü azaldıkça yakıtların tutuşma gecikmesi arasındaki farkın biraz daha azaldığını gözlenmiştir.

14. Tüm devirlerde B100, B50, B20 ve B5 kullanımıyla elde edilen CO emisyonu, PKDY göre azalma göstermiştir. Bu durum, biyodizel ve karışımlarının özgül yakıt tüketiminin PKDY’ya oranla daha yüksek olmasına rağmen gerçekleşmiştir. Biyodizel ve karışımlarının kullanılması ile CO emisyonundaki azalmanın temel nedeni biyodizelin içeriğindeki oksijendir. Karışımdaki biyodizel yüzdesi ile orantılı olarak CO emisyonunda azalma olması, biyodizel kullanımı ile silindir içerisindeki hava-yakıt oranının geliştiği göstermiştir. Tüm yakıtlar için maksimum CO emisyonu 3000 d/d’da ölçülmüştür. Bu duruma, motor devri yükseldikçe volumetrik verim azalması, silindir içerisinde artık egzoz gazı yüzdesi artması neden olmuştur. Tam yükten, 60, 40, 20 Nm sabit yüke doğru gidildikçe CO emisyonunda önemli azalmalar görülmüştür. Dizel motorların hava fazlalığı ile çalışması ve motor yükü azaldıkça hava-yakıt oranının büyümesi bu oluşumu meydana getirmiştir.

15. Tüm motor testlerinde CO<sub>2</sub> emisyonunda biyodizel ve karışımlarının kullanımı ile PKDY’ya göre belirli bir eğilimde artma veya azalma olmamıştır. Sabit yük şartlarında, her yakıt motor devrinin artışı ile artan miktarda CO<sub>2</sub> emisyonu üretmiştir. Tam yük, 60, 40 ve 20 Nm sabit yük şartları incelendiğinde, motor yükü azaldıkça CO<sub>2</sub> konsantrasyonun azaldığı gözlenmiştir. Bu durum, motor yükü azaldıkça birim zamanda püskürtülen yakıt miktarının azalmasından kaynaklanmıştır. CO<sub>2</sub> oluşumunda yakıtların hidrojen/karbon oranı etkili olmuştur. Aynı yük, devir ve hava-yakıt oranı teorik olarak incelendiğinde, her bir kg yakıt için PKDY’nın biyodizel’e göre 1,14 kat daha fazla CO<sub>2</sub> emisyonu üretmesi gerekmektedir. Pratik uygulamada ise biyodizelin özgül yakıt tüketiminin PKDY’ya göre daha fazla olması ve hava-yakıt oranının motorun o anki çalışma şartlarına göre değişmesiyle tam yanma reaksiyonlarının gerçekleşmemesi sonucu CO<sub>2</sub> oluşumunda daha farklı bir yapı ortaya çıktığı gözlenmiştir.

16. Biyodizelin özgül yakıt tüketiminin PKDY’ya göre daha fazla olması ve içeriğindeki oksijenin yakıtça zengin bölgelerde gerekli oksijeni sağlaması,

yanma bölgelerinin sayısını artırmıştır. Böylece, yüksek ortam sıcaklığının elde edildiği bölge sayısı arttığından, biyodizel kullanımı ile PKDY'ya göre daha yüksek NO<sub>x</sub> oluşumu meydana gelmiştir. Biyodizelin püskürtme başlangıcı PKDY'ya göre daha erkendir. Püskürtme başlangıcının öne alınması NO<sub>x</sub> kontrol yöntemlerinden birisi olarak bilinmesine rağmen, biyodizelin PKDY'ya göre tutuşma gecikmesi süresinin kısa olması, kontrollü yanma safhasının PKDY'ya göre daha uzun olması biyodizelin NO<sub>x</sub> oluşumuna etki etmiştir. Literatürde biyodizelin yoğunluğunun ve iyot sayısının NO<sub>x</sub> oluşumu üzerine etkisi gösterilmiştir. Tam yük, 60, 40 ve 20 Nm sabit yük şartlarındaki NO<sub>x</sub> emisyonun ortalama değerleri incelendiğinde, biyodizelin yüzdesi ile ilişkili olarak NO<sub>x</sub> emisyonunda artış gözlenmiştir. Motor yükü azaldıkça hava-yakıt oranının oldukça yüksek olması NO<sub>x</sub> oluşumunu önemli derecede artırmıştır.

17. Tüm testlerde biyodizel kullanımıyla elde edilen HC emisyonu PKDY'ya göre daha düşük seviyededir. Biyodizel ve karışımlarının kullanımı ile yanmamış HC emisyonundaki azalmanın temel nedeni, biyodizelin içeriğinde bulunan oksijenin zengin yakıt-hava karışım bölgelerinde yeterli oksitlenmeyi sağlamasıdır. Tüm yakıtların düşük motor hızlarında yüksek seviyede yanmamış HC emisyonu üretmesi, bu hızlarda özgül yakıt tüketiminin yüksek seviyede olmasından, silindir basıncının düşük olmasından, döngüsel hava hareketlerinin yavaş olmasından, atomizasyon oranının düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Bu etkenler yüksek devirlere gidildikçe HC'lerin tam veya kısmi oksitlenmesini artırdığından, yanmamış HC emisyonlarında bir azalma meydana gelmiştir. Biyodizelin setan sayısı PKDY göre daha yüksek olduğundan biyodizel ve karışımlarının kullanımı ile PKDY göre tutuşma gecikmesi süresi kısalmıştır. Bu durum, egzoz supabının açılma zamanına kadar olan oksidasyon süresinin uzamasına yol açmıştır. Bu yüzden de, biyodizel ve karışımlarının kullanımı ile HC emisyonlarında bir azalma meydana gelmiştir. Dizel motorlarda yanma odasının tipi ve şekli emisyon miktarını önemli derecede etkilemektedir. EDP dizel motorlar, DP dizel motorlara nazaran daha az yanmamış HC emisyonu üretmektedir. Bu çalışmada görülmüştür ki, hem PKDY hem de biyodizel kullanımı sırasında üretilen yanmamış HC emisyonu içten yanmalı bir motor için çok küçük seviyededir.

18. Testlerde biyodizel ve karışımlarının kullanımı ile duman koyuluğunda PKDY'a göre azalma olmuştur. Biyodizel ve karışımlarının kullanımı ile duman koyuluğundaki azalmanın temel nedeni, biyodizelin oksijen içeriğidir. PKDY kullanımı ile duman koyuluğunun yüksek çıkmasına bir başka neden olarak da, yakıtın içeriğindeki aromatik bileşikler gösterilebilir. Biyodizelin yok denecek kadar az aromatik ve sülfür içermesi is emisyonlarında önemli azalmalar sağlamıştır. Literatürde genel eğilim biyodizelin is ve partikül emisyonlarını azalttığı yönündedir. Motor yükü azaldıkça duman koyuluğu yüzdesinin azaldığı gözlenmiştir. Bu durum, motor yükü azaldıkça birim zamanda püskürtülen yakıt miktarının azalmasından ve silindir içerisindeki hava miktarının artmasından kaynaklanmıştır.

Bundan sonraki çalışmalarda çeşitli tipteki atık bitkisel ve hayvansal yağlardan biyodizel üretimi ile ilgili çalışmaların yapılması, Türkiye için biyodizel kaynaklarının çeşitlendirilmesi adına iyi bir veri tabanı oluşturacaktır. Özellikle atık tavuk yağlarının biyodizel olarak değerlendirilmesi Türkiye açısından önemli bir kaynak olacağını düşünüyorum. Motor testlerinde biyodizel kullanımı ile silindir gaz basıncının üst ölü noktaya hafifçe yaklaşması ve yakıt hattı basıncının üst ölü noktadan uzaklaşması, biyodizel kullanıldığı zaman avans testlerinin irdelenmesi gerektiğine işaret etmektedir. Bilimsel literatür incelemesinde, özellikle ön yanma odalı dizel motorlarda farklı avans değerlerinde alternatif yakıt araştırmaları ile detaylı bilgiye rastlanmamıştır. Bundan sonraki çalışmalarda, ön yanma odalı bir dizel motorun fabrika tanımlı ayarları dışında çeşitli avans konumlarında biyodizelin motor performans ve emisyon karakterleri üzerine etkisinin incelenmesi bilimsel açısından çok yararlı olacağını düşünüyorum.



## KAYNAKLAR

- [1] Çanakçı, M., Özsezen, A.N., “Dizel motorları yardımcı ekipmanlarındaki gelişmeler”, *Mühendis ve Makina*, Cilt 45, Sayı 530, 37-42, (2004).
- [2] Heywood, J.B., “Internal Combustion Engine Fundamentals”, *McGraw-Hill*, New York, 491-558, (1988).
- [3] Graboski, M.S, McCormick, R.L, Alleman, T.L., Herring, A.M., “The effect of biodiesel composition on engine emissions from A DDC Series 60 diesel engine”, *NREL Final Report 2*, February, 2003.
- [4] Abdel-Rahman, A.A., “On the emissions from internal-combustion engines: A Review”, *International Journal of Energy Research*, Vol.22, 483-513, (1998).
- [5] Schmidt, K. and Van Gerpen, J.H., “The effect of biodiesel fuel composition on diesel combustion and emissions”, *SAE Paper*, No.961086, (1996).
- [6] Lüders, H., Stommel, P. and Geckler, S. “Diesel exhaust treatment - New approaches to ultra low emission diesel vehicles”, *SAE paper*, No.1999-01-0108, (1999).
- [7] The European Biodiesel Board, <http://www.ebb-eu.org/stats.php>, (**Ziyaret tarihi: 10 Ocak 2007**)
- [8] Kann, J., Rang, H. and Kriis, J. “Advances in biodiesel fuel research”, *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences: Chemistry*, Vol.51, Issue 2, 75-117, (2002).
- [9] Ma, F., Hanna, A. M., “Biodiesel production: A Review”, *Bioresource Technology*, Vol.70, 1-15, (1999).
- [10] Karaosmanoğlu, F., “Vegetable oil fuels: A Review”, *Energy Sources*, Vol.21, 221-231, (1999).
- [11] Dorado, M.P., Ballesteros, E., Arnal, J. M., Gomez, J., Lopez Gimenez, F.J. “Testing waste olive methyl ester as a fuel in a diesel engine”, *Energy and Fuels*, Vol.17, 1560-1565, (2003).
- [12] Murayama, T., Fujiwara, Y., Noto, T. “Evaluating waste vegetable oils as a diesel fuel”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part D*, Vol.214, 141-148, (2000).

- [13] Gençoğlu, M.F., “Yenilenebilir enerji kaynaklarının Türkiye açısından nemi”, *F.Ü. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 14, Sayı 2, 57-64, (2002).
- [14] Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü, biyodizel web sayfası, [http://www.eie.gov.tr/biyodizel/index\\_biyodizel.html](http://www.eie.gov.tr/biyodizel/index_biyodizel.html), (Ziyaret tarihi: 10 Ocak 2007)
- [15] anakçı, M., Özsezen, A.N., “Atık mutfak yağlarının alternatif dizel yakıtı olarak değerlendirilmesi”, *G.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, Cilt 18, No.1, 81-91, (2005).
- [16] Anon., M.C. “Filtered used frying fat powers diesel fleet”, *Journal of the American Oil Chemists’ Society*, Vol.59, 780-781, (1982).
- [17] Karaosmanoglu, F., Kurt, G., Ozaktas, T., “Direct use of sunflower oil as a compression-ignition engine fuel”, *Energy Sources*, Vol.22, 659-672, (2000).
- [18] Yu, C.W., Bari, S., Ameen, A., “A Comparison of combustion characteristics of waste cooking oil with diesel as fuel in a direct injection diesel engine”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part D*, Vol.216, 237-243, (2002).
- [19] Kalam, M.A., Husnawan, M., Masjuki, H.H., “Exhaust emission and combustion evaluation of coconut oil-powered indirect injection diesel engine”, *Renewable Energy*, Vol.28, 2405-2415, (2003).
- [20] Ziejewski M., Goettler, H.J., Haines, H., Huang, C., “EMA Durability tests on high oleic sunflower and safflower oils in diesel engines”, *SAE Paper*, No.961846, (1996).
- [21] Knothe, G., Dunn, R., Bagby, M., “Biodiesel: The Use of Vegetable Oils and Their Derivatives as Alternative Diesel Fuels”, *In ACS Symp. Ser. No. 666: Fuels and Chemicals from Biomass*, 172-208, (1997).
- [22] Karaosmanoğlu, F., Kurt, G., Özaktaş, T., “Long term CI engine test of sunflower oil”, *Renewable Energy*, Vol.19, 219-221, (2000).
- [23] Zhang, Y., Dube, M.A., Mclean, D.D., Kates, M., “Biodiesel production from waste cooking oil: 1. process design and technological assessment”, *Biosource Technology*, Vol.89, 1-16, (2003).
- [24] Ulusoy, Y., Tekin, Y., Cetinkaya, M., Karaosmanoğlu, F., “The engine tests of biodiesel from used frying oils”, *Energy Sources*, Vol.26, 927-932, (2004).
- [25] Y. Yoshimoto, M. Onodera, H. Tamaki, “Reduction of NO<sub>x</sub>, smoke, and bsfc in a diesel engine fueled by biodiesel emulsion with used frying oil”, *SAE Paper* No.1999-01-3598 (1999).

- [26] Graboski, M.S, McCormick, R.L., “Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in diesel engines”, *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol.24, 125-164, (1998).
- [27] Peterson, C.L., Reece, D.L., Hammond, B., Thompson, J.C., Beck, S., “Commercialization of Idaho biodiesel (HySEE) from ethanol and waste vegetable oil”, *ASAE Paper*, No.956738, (1995).
- [28] Graboski, M.S., Ross, J.D., McCormick, R.L., “Transient emissions from No.2 diesel and biodiesel blends in a DDC Series 60 engine”, *SAE Paper*, No.961166, (1996).
- [29] Masjuki, H., Abdulmuin, M.Z., Sii, H.S., “Indirect injection diesel engine operation on palm oil methyl esters and its emulsions”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part D*, Vol.211, 291-299, (1997).
- [30] Monyem, A., Van Gerpen, J.H., “The effect of biodiesel oxidation on engine performance and emissions”, *Biomass and Bioenergy*, Vol.20, 317-235, (2001).
- [31] Canakci, M., “Production of biodiesel from feedstocks with high free fatty acids and its effect on diesel engine performance and emissions”, Ph.D. Thesis, *Iowa State University, USA*, (2001).
- [32] Haas J.M., Scott, K.M., Alleman, T.L. McCormick R.L., “Engine performance of biodiesel fuel prepared from soybean soapstock: A high quality renewable fuel produced from a waste feedstocks” *Energy and Fuels*, Vol.15, 1207-1212, (2001).
- [33] Usta, N., “Use of tobacco seed oil methyl ester in a turbocharged indirect injection diesel engine”, *Biomass and Bioenergy*, Vol.28, 77-86, (2005).
- [34] Xiao, Z., Ladommatos, N., Zhao, H., “The effect of aromatic hydrocarbons and oxygenates on diesel engine emissions”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part D*, Vol.214, 307-332, (2000).
- [35] Asaumi, Y., Shintani, M., Watanabe, Y., “Effects of fuel properties on diesel engine exhaust emission characteristics”, *SAE Paper*, No.922214, (1992).
- [36] Betts, W.E., Floysand, S.A., Kvinge, F., “The influence of diesel fuel properties on particulate emissions in european cars”, *SAE Paper*, No.922190, (1992).
- [37] Rosenthal, M.L., Bendinsky, T., “The effects of fuel properties and chemistry on the emissions and heat release of low-emission heavy duty diesel engines”, *SAE Paper*, No.932800, (1993).
- [38] Last, R.J., Krüger, M., Dürnholz, M., “Emissions and performance characteristics of a 4-stroke, direct injected diesel engine fueled with blends of biodiesel and low sulfur diesel fuel”, *SAE Paper*, No.950054, (1995).

- [39] Canakci, M., Van Gerpen, J.H., “Comparison of engine performance and emissions for petroleum diesel fuel, yellow grease biodiesel, and soybean oil biodiesel”, *Transactions of the ASAE*, Vol.46, No.4, 937–944, (2003).
- [40] Scholl, K.W., Sorenson, S.C., “Combustion of soybean oil methyl ester in a direct injection diesel engine”, *SAE Paper*, No.930934, (1993).
- [41] Schumacher, L.G., Marshall, W., Krahl, J., Wetherell, W.B., Grabowski, M.S., “Biodiesel emissions data from Series 60 DDC engines”, *Transactions of the ASAE*, Vol.44, No.6, 1465–1468, (2001).
- [42] Gomez Gonzales, M.E., Howard-Hildige, R., Leahy, J.J., O’Reilly, T.O., Supple, B., Malone, M., “Emission and performance characteristics of a 2 liter toyota van operating on esterified waste cooking oil and mineral diesel fuel”, *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol.65, 13–20, (2000).
- [43] Dorado, M.P., Ballesteros, E., Arnal, J.M., Gomez, J., Gimenez Lopez, F.J., “Exhaust emissions from a diesel engine fueled with transesterified waste olive oil”, *Fuel*, Vol.82, Issue 11, 1311–1315, (2003).
- [44] Clark, N.N., Lyons, D.W., “Class 8 truck emissions testing: Effects of test cycles and data on biodiesel operation”, *Transactions of the ASAE*, Vol.42, No.5, 1211-1220, (1999).
- [45] Senatore, A., Cardone, M., Rocco, V., Prati, M.V., “A comparative analysis of combustion process in DI diesel engine fueled with biodiesel and diesel fuel”, *SAE Paper*, No.2000-01-0691, (2000).
- [46] Schumacher, L., Borgelt, S.C., Hires, W.G, Wetherell, W., Nevils, A., “100,000 Miles of fueling 5.9L Cummins engines with 100% biodiesel”, *SAE Paper*, No.962233, (1996).
- [47] Chang, Y.Z., Van Gerpen, J.H., Lee, I., Johnson, L.A., Hammond, E.G., Marley, S.J., “Fuel properties and emissions of soybean oil esters as diesel fuel”, *Journal of the American Oil Chemists’ Society*, Vol.73, No.11, 1549-1555, (1996).
- [48] Sharp, C.A., Characterization of biodiesel exhaust emissions for EPA 211(b), *Report No.08-1039A, NBB*, (1998).
- [49] Sharp, C.A., Howell, S., Jobe, J., “The effect of biodiesel fuels on transient emissions from modern diesel engines - Part I: Regulated emissions and performance”, *SAE Paper*, No.2000-01-1967, (2000).
- [50] Peterson, C.L., Taberski, J.S., Thompson, J.C., Chase, C.L., “The effect of biodiesel feedstock on regulated emissions in chassis dynamometer tests of a pickup truck” *Transactions of the ASAE*, Vol.43, No.6, 1371-1381, (2000).
- [51] McCormick, R.L., Alvarez, J.R., Graboski, M.S., “NO<sub>x</sub> solutions for biodiesel”, *Report No.NREL/SR-510-31465, NREL*, (2003).

- [52] Rakopoulos, C.D., Antonopoulos, K.A., Rakopoulos, D.C., Giakoumis, E.G., “Study of combustion in a divided chamber turbocharged diesel engine by experimental heat release analysis in its chambers”, *Applied Thermal Engineering*, Vol.26, Issues 14-15, 1611-1620, (2006).
- [53] Owen, K., Coley, T., “Automotive Fuels Reference Book”, Second Edition, *SAE International*, USA, 372-379, (1995).
- [54] Challen, B., Baranescu, R., “Diesel Engine Reference Book”, Second Edition, *Butterworth Heinemann*, 79-120, (1999).
- [55] <http://www.deh.gov.au/atmosphere/fuelquality/publications/pubs/biodiesel-paper.pdf>, Setting National Fuel Quality Standards, Paper 6 National Standard for Biodiesel – Discussion Paper Prepared by Environment Australia, March (2003). (Ziyaret tarihi: 10 Ocak 2007)
- [56] Van Gerpen, J., Shanks, B., Pruszko, R., Clements, D. and Knothe, G., “Biodiesel production technology”, *NREL Subcontractor Report*, July, (2004).
- [57] Fukuda, H., Kondo, A., Noda, H., “Biodiesel fuel production by transesterification of oils”, *Journal of Bioscience and Bioengineering*, Vol.92, Issue 5, 405-416, (2001).
- [58] Canakci, M., Van Gerpen, J.H., “A pilot plant to produce biodiesel from high free fatty acid feedstocks”, *Transactions of the ASAE*, Vol.46, No.4, 945-955, (2003).
- [59] Tomasevic, A.V., Siler-Marinkovic, S.S., “Methanolysis of used frying oil”, *Fuel Processing Technology*, Vol.80, 1-6, (2002).
- [60] Freedman, B., Butterfield, R. O., Pryde, E. H., “Transesterification kinetics of soybean oil”, *Journal of the American Oil Chemists’ Society*, Vol.63, No.10, 1375–1380, (1986).
- [61] Encinar, J.M., Gonzalez, J. F., Rodriguez, J. J., Tejedor, A., “Biodiesel fuels from vegetable oils: Transesterification of Cynara Cardunculus L. oils with ethanol”, *Energy and Fuels*, Vol.16, 443-450, (2001).
- [62] Canakci, M., Van Gerpen, J.H., “Biodiesel production via acid catalyzed”, *Transactions of ASAE*, Vol.42, No.5, 1203-12010, (1999).
- [63] Freedman, B., Pryde, E. H., Mounts, T. L., “Variables affecting the yields of fatty esters from transesterification vegetable oils”, *Journal of the American Oil Chemists’ Society*, Vol.61, No.10, 1638-1643, (1984).
- [64] Srivastava, A., Prasad, R., “Triglycerides-based diesel fuels”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.4, 111–133, (2000).

- [65] Isigigur, A., Karaosmonolu F., Aksoy, H.A., “Methyl ester from safflower seed oil of Turkish origin as a biofuel for diesel engines”, *Applied Biochemistry and Biotechnology*, Vol.45/46, 103–112, (1994).
- [66] Karaosmanoğlu, F., Cıgızoğlu, K. B., Tüter, M., Ertekin, S., “Investigation of the refining step of biodiesel production”, *Energy and Fuels*, Vol.10, 890-895, (1996).
- [67] Vicente, G., Coteron, A., Martinez, M., Aracil, J., “Application of the factorial of experiments and response surface methodology to optimize biodiesel production”, *Industrial Crops and Products*, Vol.8, 29-35, (1998).
- [68] Mittelbach, M., “Lipase catalyzed alcoholysis of sunflower oil”, *Journal of the American Oil Chemists’ Society*, Vol.67, 168–170, (1990).
- [69] Darnoko, D., Cheryan, M., “Kinetics of palm oil transesterification in a batch reactor”, *Journal of the American Oil Chemists’ Society*, Vol.77, No.12, 1263–1267, (2000).
- [70] Arvinder, P.S., Thompson, J.C., Brian He, B., “A continuous-flow reactive distillation reactor for biodiesel preparation from seed oils”, *ASEA Paper*, No.046071, (2004).
- [71] Demir, İ., Demirbag, Z., “Polisiklik aromatik hidrokarbonların biyolojik olarak parçalanması”, *Turkish journal of biology*, Vol.23, 293–302, (1999).
- [72] [https://www.fleet.ford.com/showroom/enviromental\\_vehicles/BiodieselTechnology.asp](https://www.fleet.ford.com/showroom/enviromental_vehicles/BiodieselTechnology.asp), (**Ziyaret tarihi: 15 Kasım 2006**).
- [73] [http://www.biodiesel.org/pdf\\_files/OEM%20Statements/2005\\_OEM\\_VW%20US%20Biodiesel\\_Statement\\_5\\_16\\_05.pdf](http://www.biodiesel.org/pdf_files/OEM%20Statements/2005_OEM_VW%20US%20Biodiesel_Statement_5_16_05.pdf), (**Ziyaret tarihi: 10 Ocak 2007**).
- [74] Commercial Diesel Engine Fluids Recommendations, *Caterpillar*, March (2004).
- [75] [http://www.deere.com/en\\_US/ag/servicesupport/tips/tractors/common\\_stories/biodiesel\\_in\\_john\\_deere\\_tractors.html](http://www.deere.com/en_US/ag/servicesupport/tips/tractors/common_stories/biodiesel_in_john_deere_tractors.html), (**Ziyaret tarihi: 10 Ocak 2007**).
- [76] Technical Service Information, *International Truck and Engine Corp.*, May, (2005).
- [77] BMC Motor Katalogu, (2000).
- [78] Zhao, H., Ladammatos, N., “Engine Combustion Instrumentation and Diagnostics”, *SAE Warrendale*, USA, (2001).
- [79] Pulkrabek, W.W., “Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine”, *Prentice-Hall*, New Jersey, (1997).

- [80] Borat, O., Balcı, M., Sürmen, A., “İçten Yanmalı Motorlar”, *Teknik Eğitim Vakfı Yayınları*, Cilt 1, Ankara, (1992).
- [81] Darby, R., “Chemical Engineering Fluid Mechanics”, Second edition, *Marcel Dekker Incorporated*, New York, USA, 297- 315, (2001).
- [82] Figliola, R.S., Beasley, D.E., “Theory and Design for Mechanical Measurements”, Fourth edition, *John Wiley & Sons, Inc.*, 389-396, (2006).
- [83] Altın, R., Yücesu, S., “Ham pamuk yağı ve pamuk metil esteri yakıtlarının dizel motorlarında kullanılabilirliğinin deneysel olarak araştırılması”, 6. Uluslar arası Yanma Sempozyumu, 43-57, İstanbul, 19-21 Temmuz (1999).
- [84] Salman, S., Çınar, C., Topgül, T. ve Haşımoğlu, C., “Bir dizel motorunda egzoz gazları, soğutma suyu ve sürtünmeler yoluyla kaybedilen ısı enerjisinin belirlenmesi”, *Politeknik Dergisi*, Cilt 5, Sayı 3, 233-236, (2002).
- [85] Stone, R., “Introduction to Internal Combustion Engines”, 3th Edition, *SAE Warrendale*, USA, (1999).
- [86] Borman, G.L., Ragland, K.W., “Combustion Engineering”, *McGraw-Hill*, New York, (1998).
- [87] Crua, C., Kennaird, D.A., Sazhin, S.S., Heikal, M.R., “Diesel autoignition at elevated in-cylinder pressures”, *International Journal of Engine Research*, Vol.5, No.4, 365-374, (2004).
- [88] Aligrot, C., Champoussin, J.C., Guerassi, N., Claus, G., “A correlative model to predict autoignition delay of diesel fuels”, *SAE Paper*, No.970638, (1997).
- [89] Astarita, M., Corcione, F.E., Vaglieco, B.M., Valentino, G., “Fuel composition effects on air–fuel mixing and self-ignition in a divided chamber diesel system by optical diagnostics”, *SAE Paper*, 1999-01-0510, (1999).
- [90] Assanis, D.N., Filipi, Z.S., Fiveland, S.B., Syrimis, M., “A Methodology for cycle-by-cycle transient heat release analysis in a turbocharged direct injection diesel engine”, *SAE Paper*, No. 2000-01-1185, (2000).
- [91] Homsy, S.C., Atreya, A., “An experimental heat release rate analysis of a diesel engine operating under steady state conditions”, *SAE Paper*, No.970889, (1997).
- [92] Brunt, M.F.J., Platts, K.C., “Calculation of heat release in direct injection diesel engines”, *SAE Paper*, No.1999-01-0187, (1999).
- [93] Li, J., Zhou, L., Pan, K., Jiang, D., Chae, J., “Evaluation of the thermodynamic process of indirect injection diesel engines by the first and second law”, *SAE Paper*, No.952055, (1995).

- [94] Monyem, A., “The Effect of Biodiesel Oxidation on Engine Performance and Emissions”, Ph.D. Thesis, *Iowa State University*, USA, (1998).
- [95] Adler, U., “Automotive Handbook”, *Robert Bosch GmbH*, Stuttgart, (1993).
- [96] Westerholm, R., Egeback, K., “Exhaust emissions from light- and heavy-duty vehicles: chemical composition, impact of exhaust after treatment, and fuel parameters”, *Environmental Health Perspectives*, 102, Supplement 4, October, (1994).
- [97] <http://www.acidrain.org/pages/publications/factsheet/factsheet17.htm>, (**Ziyaret tarihi: 10 Ocak 2007**).
- [98] <http://www.dieselnet.com/standards.html>, (**Ziyaret tarihi: 10 Ocak 2007**).
- [99] European Federation for Transport and Environment, “Waiting for Euro 5 and Euro 6 New Emission Standards for Passenger Cars, Vans and Lorries”, (2005).
- [100] Soruşbay, C., “İçten Yanmalı Motorlarda Egzoz Gazları Emisyonu”, Ders Notları, *İTÜ*, İstanbul, (1999).
- [101] SAE Handbook, *Society of Automotive Engineers*, Inc., Warrendale, MI, Vol.1, 1304-1306, (2001).
- [102] Kegl, B., “Numerical analysis of injection characteristics using biodiesel fuel”, *Fuel*, Vol.85, 2377-2387, (2006).
- [103] Yamane, K., Ueta, A., Shimamoto, Y., “Influence of physical and chemical properties of biodiesel fuels on injection, combustion and exhaust emission characteristics in a direct injection compression ignition engine”, *International Journal of Engine Research*, Vol.2, No.4, 249-261, (2001).
- [104] Tat, M.E., Van Gerpen, J.H., Soyly, S., Canakci, M., Monyem, A., Wormley, S., “Speed of sound and isentropic bulk modulus of biodiesel at 21 degree C from atmospheric pressure to 35 MPa”, *Journal of the American Oil Chemists’ Society*, Vol.77, No.3, 285-289, (2000).
- [105] Rodriguez-Anton, L.M., Casanova-Kindelan, J., Tardajos, G., “High pressure physical properties of fluids used in diesel injection systems”, *SAE Paper*, No.2000-01-2046, (2000).
- [106] Zhang, Y., Van Gerpen, J.H., “Combustion analysis of esters of soybean oil in a diesel engine”, *SAE Paper*, No.960765, (1996).
- [107] Peterson, C.L., Hustrulid, T., “Carbon cycle for rapeseed oil biodiesel fuels”, *Biomass and Bioenergy*, Vol.14, Issue 17-18, 91-101, (1998).



- [108] Wang, W.G., Lyons, D.W., Clark, N.N., Gautam, M., Norton, P.M., “Emissions from nine heavy trucks fueled by diesel and biodiesel blend without engine modification”, *Environmental Science Technology*, Vol.34, 933-939, (2000)
- [109] Kanda, T., Hakozaki, T., Uchimoto, T., Hatano, J., Kitayama, N., Sono, H., “PCCI operation with fuel injection timing set close to TDC”, *SAE Paper*, No.2006-01-0920, (2006).
- [110] Peterson, C.L., Reece, D.L., “Emissions test with an on-road vehicle fueled with methyl and ethyl esters of rapeseed oil”, *ASAE Paper*, No.946532, (1994).
- [111] AOCS, Official Test Method Cd 3a-63 for Acid Value, American Oil Chemists Society Champaign, III, (1998).

## **EK-A**

### **AOCS OFFICIAL METHOD CD 3A-63 [111]**

The acid value is the number of milligrams of potassium hydroxide (KOH) necessary to neutralize the free acids in 1 gram of sample. This method is applicable to crude and refined animal, vegetable, and marine fats and oils, and various products derived from them. The necessary apparatus, reagents, test procedure and the calculations for the acid value test are explained below.

#### **Apparatus:**

1. Erlenmeyer flasks, 250 ml.
2. Burette, 50 ml.

#### **Reagents:**

1. Potassium hydroxide (KOH), 0.1 N and 0.01N in water.
2. Solvent mixture contains of equal parts by volume of isopropyl alcohol and toluene.
3. Phenolphthalein indicator solution, 1.0% in isopropyl alcohol.

#### **Procedure:**

1. Add 0.8 ml phenolphthalein indicator solution to 50 ml of solvent mixture (1:1 isopropyl alcohol - toluene) and neutralize with alkali (0.01N KOH) to a faint but permanent pink color. The amount of alkali (0.01N KOH) used to neutralize the solvent mixture is the blank (B).
2. Determine the sample size from Table 1 by comparing the expected acid value. Higher acid value needs less amount of sample and lower acid value needs a large amount of sample.

Table A.1: Sample size for the test

Acid Value	Wt. of Sample (gm)
0 to 1	20
1 to 4	10
4 to 15	2.5
15 to 75	0.5
75 and over	0.1

3. Weigh the specified amount of sample from Table A.1 into an Erlenmeyer flask.
4. Add 50 ml of solvent mixture (1:1 isopropyl alcohol - toluene). Be sure that the sample is completely dissolved. Warming may be necessary in some cases.
5. Shake the sample vigorously while titrating with standard alkali (0.1N or 0.01N KOH depending upon intensity of acid value in the sample) to the first permanent pink color of the same intensity as that of the neutralized solvent. The color must persist for 30 seconds. The amount of standard alkali used in this step is A, where A is defined below.

**Calculation:**

$$\text{The acid value, mg KOH/g of sample} = (A-B) * N * 56.1/W$$

Where; A= ml of standard alkali (0.1N or 0.01N KOH) used in the titration

B= ml of standard alkali (0.1N or 0.01N KOH) used in the titrating the blank

N= normality of the standard alkali (0.1 or 0.01N KOH)

W= grams of sample

## EK-B

### SİLİNDİR BASINÇ ALGILAYICISINA AİT TEKNİK ÖZELLİKLER

Tablo B.1: Silindir gaz basıncı algılayıcısı ve sinyal şartlandırıcının özellikleri

Kistler marka 6061B model su soğutmalı piezo-elektrik basınç algılayıcısı	
Ölçüm Aralığı	0-250 Bar
Hassasiyet ve Doğrusallık	0...250 Bar (50 °C) -26,09 pC/Bar ve +/- % 0,3
Kararlı Çalışma Aralığı (°C)	0 - 350
Doğal Frekansı	90 KHz
Aşırı Yükleme	300 Bar
Kistler marka 5015A 1000 model sinyal şartlandırıcının özellikleri	
Çıkış Gerilimi	+/- 10 V
Maksimum Filtreleme	30 kHz
Sapma (pC/s;mV/s)	-0,02
Ölçüm Adımı	0,5 mV

### YAKIT HATTI BASINÇ ALGILAYICISINA AİT TEKNİK ÖZELLİKLER

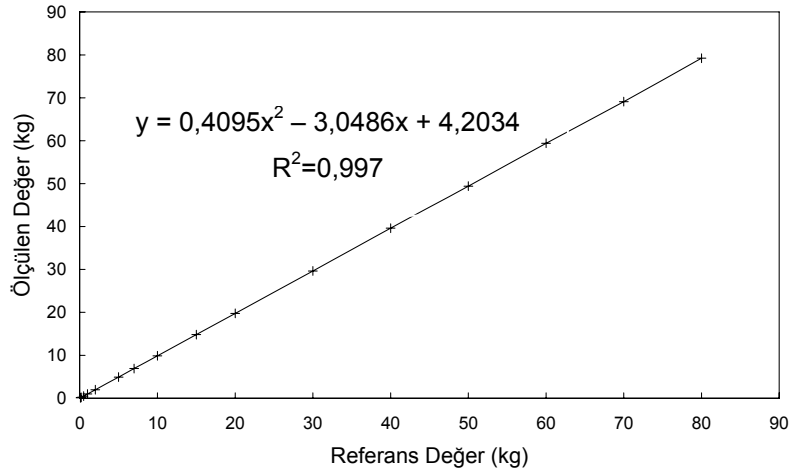
Tablo B.2: Yakıt hattı basınç algılayıcısının özellikleri

AVL marka 8QP500c su soğutmalı kuvars kristalli basınç algılayıcısı	
Ölçüm Aralığı	0-150 Bar
Hassasiyet ve Doğrusallık	0...150 Bar (50 °C) -11,11 pC/Bar ve +/- % 0,6
Kararlı Çalışma Aralığı	0 °C +350 °C
Doğal Frekansı	100 KHz
Aşırı Yükleme	250 Bar

## EK-C

### YÜK HÜCRESİ KALİBRASYONU EĞRİSİ

Yük hücresinin kalibrasyon ve gösterge ayarları sinyal koşullandırıcısı üzerinden üretici firmanın talimatları doğrultusunda yapılmıştır. Bu ayarlar parametre ayarları (filtre, kapasite, noktanın yeri, yürüme adımı) ve ağırlık kalibrasyonu ayarlarıdır. Kalibrasyon sırasında sertifikalı ağırlıklar kullanarak korelasyon katsayısı ( $R^2 = 0,9516$ ) hesaplanmış grafiği oluşturulmuştur. Testlerde kullanılan yük hücresinin hassasiyet değeri  $= 1 - R^2 = 1 - 0,9516 = \pm 0,0484$  olarak bulunmuştur.



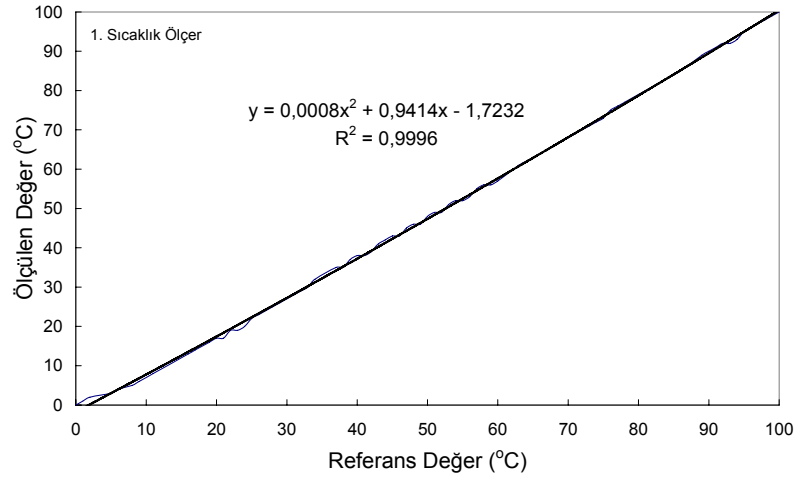
Şekil C.1: Yük hücresinin kalibrasyon eğrisi

## EK-D

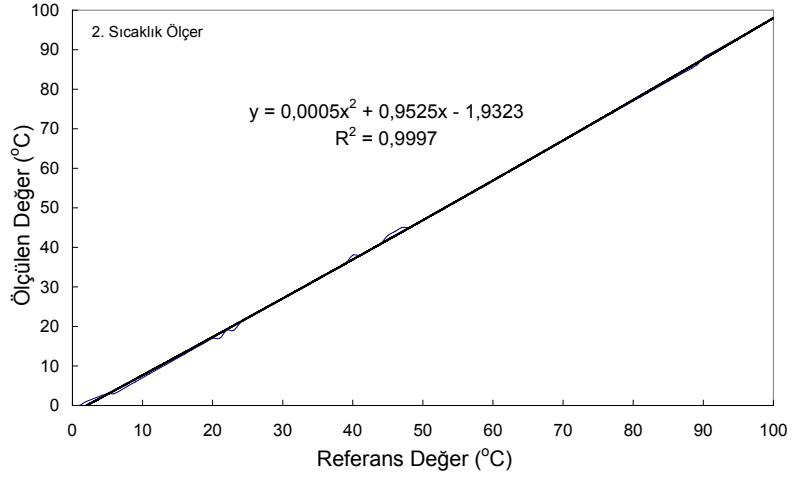
### DİJİTAL SICAKLIK ÖLÇERLERE AİT KALİBRASYON EĞRİLERİ

Korelasyon grafiğindeki referans değerleri tespit etmek için ASTM sertifikalı termometre kullanılmıştır. Sıcaklık ölçerlerin korelasyon katsayıları aşağıdaki grafiklerde verilmektedir. Testlerde kullanılan sıcaklık ölçerlerin hassasiyet değerleri

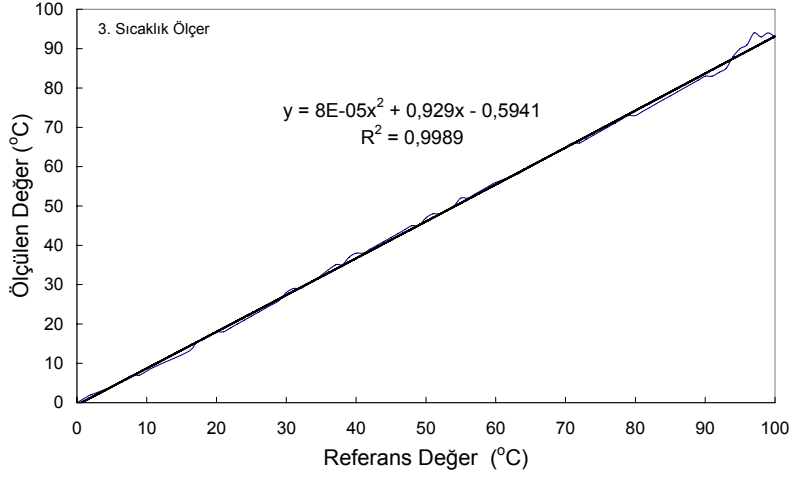
1. Sıcaklık ölçer için  $1 - R^2 = 1 - 0,9996 = \pm 0,0004$
2. Sıcaklık ölçer için  $1 - R^2 = 1 - 0,9997 = \pm 0,0003$
3. Sıcaklık ölçer için  $1 - R^2 = 1 - 0,9989 = \pm 0,0110$
4. Sıcaklık ölçer için  $1 - R^2 = 1 - 0,9878 = \pm 0,0122$  olarak belirlenmiştir.



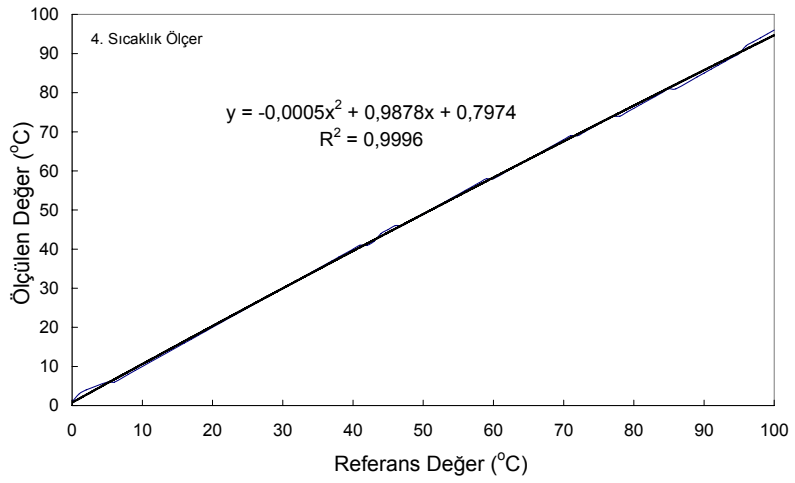
Şekil D.1: 1. Sıcaklık ölçerinin kalibrasyon eğrisi



Şekil D.1: 2. Sıcaklık ölçerin kalibrasyon eğrisi



Şekil D.1: 3. Sıcaklık ölçerin kalibrasyon eğrisi



Şekil D.1: 4. Sıcaklık ölçerin kalibrasyon eğrisi

## EK-E ÖRNEK TEST ÇİZELGELERİ

### Petrol Kökenli Dizel Yakıtının (PKDY) Tam Yükte 1000, 1500, 2000, 2500, 3000 d/d Motor Test Sonuçları

Yükleme miktarı (Nm)	84,92	88,81	95,23	91,24	85,58
Yakıt	<b>PKDY</b>				
Motor devri (dev/dak)	1000	1500	2000	2500	3000
Eğik manometrede ölçülen değer (mmH <sub>2</sub> O)	10	17	35	50	63
Çevre sıcaklığı (°C)	23,9	23,3	26,4	26,7	26,4
Bağıl nem (%)	30,8	34,2	26,3	29,4	42,3
Yaş termometre sıcaklığı (°C)	13,8	14	14,7	15,5	17,7
Atmosfer basıncı (mmHg)	735	735	730	730	735
Atmosfer basıncı (kPa)	98,00	98,00	97,33	97,33	98,00
Havanın mutlak sıcaklığı (Kelvin)	297,05	296,45	299,55	299,85	299,55
Havanın yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	1,14	1,14	1,12	1,12	1,12
Eğik manometerdeki Basınç Farkı (Pa)	100	170	350	500	630
Kütleli Hava Debisi (kg/s)	0,0149	0,0194	0,0276	0,0330	0,0370
Kütleli Hava Debisi (m <sup>3</sup> /dak)	0,7836	1,0217	1,4791	1,7678	1,9844
Teorik kütleli hava akışı (kg/s)	0,017090735	0,025636103	0,033581795	0,041977244	0,050372693
Yakıt tüketim zamanı (sn)	257	270	183	92	174
Yakıt tüketim miktarı (g)	250	370	330	200	440
Yakıt tüketimi (g/sn)	0,9728	1,3704	1,8033	2,1739	2,5287
Yakıt tüketimi (kg/sn)	0,000973	0,001370	0,001803	0,002174	0,002529
Özgül Yakıt tüketimi (g/kW-saat)	393,81	353,65	325,50	327,65	338,61
Efektif Güç (kW)	8,89	13,95	19,94	23,89	26,88
Fren ortalama efektif basıncı (kPa)	593,16	620,33	665,17	637,30	597,77
Volumetrik verim (%)	87,12	75,72	82,21	78,61	73,53
Termik verim (%)	21,29	23,71	25,76	25,59	24,77
Hava/Yakıt oranı	15,31	14,17	15,31	15,18	14,65
Yakıt/Hava oranı	0,065334966	0,07059148	0,065314714	0,065877842	0,068267713
<b>Sıcaklıklar (°C)</b>					
Yakıt sıcaklığı	20	19	23	24	26
Soğutma suyu giriş sıcaklığı	81	85	97	97	101
Soğutma suyu çıkış sıcaklığı	89	94	106	107	110
Motor yağ sıcaklığı	82	89	103	105	116
Egzoz borusu yüzey sıcaklığı	327,5	-	-	-	401,9
Egzoz gazı sıcaklığı	464,8	524,6	603,9	622,6	655,9
Egzoz ölçümü yapılan akışkanın sıcaklığı	348,3	420,9	481,5	498,8	505,6
<b>Emisyonlar</b>					
O <sub>2</sub> (%)	2,88	1,16	1,22	0,86	1,05
CO (%)	0,693	0,987	0,803	0,719	1,113
CO <sub>2</sub> (%)	12,7	13,6	13,5	13,5	13,4
HC (ppm)	9	11	8	6,5	4
NO (ppm)	76	65	55	73	121
NO <sub>x</sub> (ppm)	80	68	58	77	127
Duman koyuluğu (%)	99,5	99,6	99,2	96,1	98,4
Lambda (λ)	1,13	1,03	1,01	1,02	1,02
<b>Diğer Ölçümler (Kaydedilen dosya adı)</b>					
Silindir Basıncı (bar)	TBn1000	TBn1500	TBn2000	TBn2500	TBn3000
Enjeksiyon basıncı (bar)	TEn1000	TEn1500	TEn2000	TEn2500	TEn3000



**Biyodizelin (B100) 60 Nm Sabit Yükte  
1000, 1500, 2000, 2500, 3000 d/d Motor Test Sonuçları**

Yükleme miktarı (Nm)	60	60	60	60	60
Yakıt			<b>B100</b>		
Motor devri (dev/dak)	1000	1500	2000	2500	3000
Eğik manometrede ölçülen değer (mmH <sub>2</sub> O)	10,5	17	35	50	62
Çevre sıcaklığı (°C)	28,1	28,9	25,3	26,1	27
Bağıl nem (%)	41,2	40,9	43,9	44	40,8
Yaş termometre sıcaklığı (°C)	18,9	19,4	17,1	17,8	17,9
Atmosfer basıncı (mmHg)	735	735	736	736	736
Atmosfer basıncı (kPa)	98,00	98,00	98,13	98,13	98,13
Havanın mutlak sıcaklığı (Kelvin)	301,25	302,05	298,45	299,25	300,15
Havanın yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	1,12	1,11	1,13	1,13	1,12
Eğik manometerdeki Basınç Farkı (Pa)	105	170	350	500	620
Kütlesel Hava Debisi (kg/s)	0,015122	0,019156	0,027732	0,033146	0,036746
Kütlesel Hava Debisi (m <sup>3</sup> /dak)	0,810113	1,035435	1,472498	1,759972	1,968552
Teorik kütlesel hava akışı (kg/s)	0,016791	0,024961	0,033882	0,042352	0,050373
Yakıt tüketim zamanı (sn)	194	243	181	180	183
Yakıt tüketim miktarı (g)	170	290	270	340	430
Yakıt tüketimi (g/sn)	0,8763	1,1934	1,4917	1,8889	2,3497
Yakıt tüketimi (kg/sn)	0,000876	0,001193	0,001492	0,001889	0,002350
Özgül Yakıt tüketimi (g/kW-saat)	502,09	455,86	427,36	432,91	448,78
Efektif Güç (kW)	6,28	9,42	12,57	15,71	18,85
Fren ortalama efektif basıncı (kPa)	419,09	419,09	419,09	419,09	419,09
Volumetrik verim (%)	90,06	76,74	81,85	78,26	72,95
Termik verim (%)	18,51	20,39	21,75	21,47	20,71
Hava/Yakıt oranı	17,26	16,05	18,59	17,55	15,64
Yakıt/Hava oranı	0,0579	0,0623	0,0538	0,0570	0,0639

**Sıcaklıklar (°C)**

Yakıt sıcaklığı	27	28	26	26	26
Soğutma suyu giriş sıcaklığı	72	76	78	90	98
Soğutma suyu çıkış sıcaklığı	77	81	83	97	108
Motor yağ sıcaklığı	83	94	94	110	117
Egzoz borusu yüzey sıcaklığı	225,6	-	-	-	358,6
Egzoz gazı sıcaklığı	261,7	279,3	327,5	391,9	462,6
Egzoz ölçümü yapılan akışkanın sıcaklığı	226,9	250,6	268,2	315,9	380

**Emisyonlar**

O <sub>2</sub> (%)	10,53	9,92	9,13	8,23	6,83
CO (%)	0,200	0,152	0,092	0,124	0,174
CO <sub>2</sub> (%)	9,1	9,6	9,9	10,5	11,3
HC (ppm)	6	9	6,5	6	3,5
NO (ppm)	78	96	123	139	125
NOx (ppm)	82	101	129	150	131
Duman koyuluğu (%)	56,7	36,9	17,6	19,6	42,2
Lambda (λ)	1,78	1,71	1,66	1,55	1,42

**Diğer Ölçümler (Kaydedilen dosya adı)**

Silindir Basıncı (bar)	60B100n1000	60B100n1500	60B100n2000	60B100n2500	60B100n3000
Enjeksiyon basıncı (bar)	60B100n1000	60B100n1500	60B100n2000	60B100n2500	60B100n3000

**B50 Yakıtın 40 Nm Sabit Yükte  
1000, 1500, 2000, 2500, 3000 d/d Motor Test Sonuçları**

Yükleme miktarı (Nm)	40	40	40	40	40
Yakıt	<b>B50</b>				
Motor devri (dev/dak)	1000	1500	2000	2500	3000
Eğik manometrede ölçülen değer (mmH <sub>2</sub> O)	10	17	35	49	62
Çevre sıcaklığı (°C)	30	31,4	30,5	31,4	29,8
Bağıl nem (%)	27,4	25,8	28,6	28,4	31,2
Yaş termometre sıcaklığı (°C)	17,4	18	18	17,9	18,1
Atmosfer basıncı (mmHg)	729	728	728	728	732
Atmosfer basıncı (kPa)	97,20	97,07	97,07	97,07	97,60
Havanın mutlak sıcaklığı (Kelvin)	303,15	304,55	303,65	304,55	302,95
Havanın yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	1,10	1,10	1,10	1,10	1,11
Eğik manometerdeki Basınç Farkı (Pa)	100	170	350	490	620
Kütleli Hava Debisi (kg/s)	0,014625	0,019069	0,027361	0,032375	0,036582
Kütleli Hava Debisi (m <sup>3</sup> /dak)	0,797744	1,040131	1,492443	1,765882	1,977399
Teorik kütleli hava akışı (kg/s)	0,016491	0,024737	0,032982	0,041228	0,049923
Yakıt tüketim zamanı (sn)	232	188	228	195	197
Yakıt tüketim miktarı (g)	140	160	250	270	340
Yakıt tüketimi (g/sn)	0,6034	0,8511	1,0965	1,3846	1,7259
Yakıt tüketimi (kg/sn)	0,000603	0,000851	0,001096	0,001385	0,001726
Özgül Yakıt tüketimi (g/kW-saat)	518,64	487,64	471,20	476,01	494,45
Efektif Güç (kW)	4,19	6,28	8,38	10,47	12,57
Fren ortalama efektif basıncı (kPa)	279,40	279,40	279,40	279,40	279,40
Volumetrik verim (%)	88,69	77,09	82,96	78,53	73,28
Termik verim (%)	17,00	18,08	18,71	18,52	17,83
Hava/Yakıt oranı	24,24	22,41	24,95	23,38	21,20
Yakıt/Hava oranı	0,0413	0,0446	0,0401	0,0428	0,0472

**Sıcaklıklar (°C)**

Yakıt sıcaklığı	25	28	30	31	29
Soğutma suyu giriş sıcaklığı	67	75	77	87	95
Soğutma suyu çıkış sıcaklığı	70	78	81	93	104
Motor yağ sıcaklığı	81	93	99	111	113
Egzoz borusu yüzey sıcaklığı	135,1	-	-	-	249,8
Egzoz gazı sıcaklığı	210,7	232,1	259,2	291,3	358,4
Egzoz ölçümü yapılan akışkanın sıcaklığı	156,8	197,6	218,2	260,1	309,4

**Emisyonlar**

O <sub>2</sub> (%)	12,36	11,39	11,29	10,99	9,51
CO (%)	0,083	0,094	0,092	0,090	0,180
CO <sub>2</sub> (%)	7,8	8,6	8,7	8,8	9,6
HC (ppm)	8,5	11	9	6	4
NO (ppm)	135	167	214	224	326
NOx (ppm)	142	175	225	235	342
Duman koyuluğu (%)	43,1	26,3	11,2	12,8	24,7
Lambda (λ)	2,1	1,91	1,9	1,87	1,68

**Diğer Ölçümler (Kaydedilen dosya adı)**

Silindir Basıncı (bar)	40B50n1000	40B50n1500	40B50n2000	40B50n2500	40B50n3000
Enjeksiyon basıncı (bar)	40B50n1000	40B50n1500	40B50n2000	40B50n2500	40B50n3000

**B20 Yakıtın Tam Yükte**  
**1000, 1500, 2000, 2500, 3000 d/d Motor Test Sonuçları**

Yükleme miktarı (Nm)	20	20	20	20	20
Yakıt	<b>B20</b>				
Motor devri (dev/dak)	1000	1500	2000	2500	3000
Eğik manometrede ölçülen değer (mmH <sub>2</sub> O)	10	17	35	52	63
Çevre sıcaklığı (°C)	22,2	23,0	25,3	25,3	24,4
Bağıl nem (%)	49,9	46,9	40,1	41,9	43,7
Yaş termometre sıcaklığı (°C)	15,6	15,8	16,5	16,8	16,4
Atmosfer basıncı (mmHg)	740	739	739	738	738
Atmosfer basıncı (kPa)	98,67	98,53	98,53	98,40	98,40
Havanın mutlak sıcaklığı (Kelvin)	295,35	296,15	298,45	298,45	297,55
Havanın yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	1,15	1,14	1,14	1,13	1,14
Eğik manometerdeki Basınç Farkı (Pa)	100	170	350	520	630
Kütlesel Hava Debisi (kg/s)	0,014954	0,019413	0,027854	0,033803	0,037371
Kütlesel Hava Debisi (m <sup>3</sup> /dak)	0,780209	1,021720	1,466026	1,794827	1,966880
Teorik kütlesel hava akışı (kg/s)	0,017241	0,025636	0,034181	0,042352	0,051272
Yakıt tüketim zamanı (sn)	225	205	197	197	193
Yakıt tüketim miktarı (g)	70	90	110	140	170
Yakıt tüketimi (g/sn)	0,3111	0,4390	0,5584	0,7107	0,8808
Yakıt tüketimi (kg/sn)	0,000311	0,000439	0,000558	0,000711	0,000881
Özgül Yakıt tüketimi (g/kW-saat)	534,78	503,10	479,90	488,63	504,69
Efektif Güç (kW)	2,09	3,14	4,19	5,24	6,28
Fren ortalama efektif basıncı (kPa)	139,70	139,70	139,70	139,70	139,70
Volumetrik verim (%)	86,74	75,72	81,49	79,81	72,89
Termik verim (%)	15,99	17,00	17,82	17,50	16,95
Hava/Yakıt oranı	48,07	44,22	49,88	47,57	42,43
Yakıt/Hava oranı	0,0208	0,0226	0,0200	0,0210	0,0236

**Sıcaklıklar (°C)**

Yakıt sıcaklığı	20	24	23	24	23
Soğutma suyu giriş sıcaklığı	60	62	67	74	80
Soğutma suyu çıkış sıcaklığı	64	65	71	79	87
Motor yağ sıcaklığı	83	84	94	86	96
Egzoz borusu yüzey sıcaklığı	124,5	-	-	-	198,7
Egzoz gazı sıcaklığı	153,3	175,6	186,8	235,4	273,5
Egzoz ölçümü yapılan akışkanın sıcaklığı	142,1	162,3	177	201,1	218,7

**Emisyonlar**

O <sub>2</sub> (%)	14,38	14,13	13,93	12,84	12,44
CO (%)	0,049	0,052	0,063	0,091	0,108
CO <sub>2</sub> (%)	6,6	6,7	7	7,5	8,1
HC (ppm)	7	7,5	7,5	7,5	5,5
NO (ppm)	152	151	213	258	370
NOx (ppm)	160	159	224	271	389
Duman koyuluğu (%)	8,9	12,5	5,6	7,1	12,3
Lambda (λ)	2,51	2,42	2,4	2,15	2,06

**Diğer Ölçümler (Kaydedilen dosya adı)**

Silindir Basıncı (bar)	20B20n1000	20B20n1500	20B20n2000	20B20n2500	20B20n3000
Enjeksiyon basıncı (bar)	20B20n1000	20B20n1500	20B20n2000	20B20n2500	20B20n3000

**B5 Yakıtının Tam Yükte Gerçek NO<sub>x</sub> Değerinin Bulunması**  
**1000, 1500, 2000, 2500, 3000 d/d Motor Test Sonuçları**

Yükleme miktarı (Nm)	82,15	86,91	94,90	88,24	84,60
Yakıt			<b>B5</b>		
Motor devri (dev/dak)	1000	1500	2000	2500	3000
Çevre sıcaklığı (°C) - T <sub>ç</sub>	21,6	23,3	25,6	25,3	23,3
Yaş termometre sıcaklığı (°C) - T <sub>w</sub>	17	17,5	18	18,1	17,3
Atmosfer basıncı (kPa) - P <sub>b</sub>	98,27	98,27	98,27	98,27	98,27
Ölçülen NO konsantrasyonu (ppm) - [NO] <sub>yaş</sub>	63	68	55	96	115
Ölçülen NO <sub>x</sub> konsantrasyonu (ppm) - [NO <sub>x</sub> ] <sub>yaş</sub>	67	71	61	101	121
Efektif Güç (kW)	8,6	13,65	19,88	23,1	26,58
Yakıt tüketimi (kg/sn)	0,000903	0,001385	0,001848	0,002171	0,002662
Yakıt tüketimi (kg/saat)	3,2508	4,986	6,6528	7,8156	9,5832
Hava / Yakıt oranı	16,48	14,02	15,01	15,42	14,04
Yakıt / Hava oranı	0,060678069	0,071325279	0,066631419	0,064865303	0,071228769
Özgül nem (g H <sub>2</sub> O / kg kuru hava) - h	10,45749077	10,34238096	9,978590082	10,2359026	10,09311326
Su buharının kısmi basıncı (kPa) - P <sub>v</sub>	1,627179841	1,609562182	1,553841412	1,593259855	1,571389515
Yaş termometre sıcaklığındaki su buharının doyma basıncı (kPa) - P <sub>w</sub>	1,93164694	1,993672356	2,057442372	2,070409346	1,968655125
Denyesel olarak türetilen sabit sayı - A	0,000374187	0,000374399	0,00037461	0,000374652	0,000374314
Düzeltilme faktörü denklemindeki sabit sayılar					
k	1,026577716	1,034608371	1,0212779	1,019757775	1,035657579
A	-0,00113016	-0,00066169	-0,00086822	-0,00094593	-0,00066593
B	-0,00173866	-0,00297373	-0,00242924	-0,00222438	-0,00296254
Düzeltilmiş NO konsantrasyonu [NO] <sub>düz</sub> (ppm)	61,37	65,73	53,85	94,14	111,04
Düzeltilmiş NO <sub>x</sub> konsantrasyonu [NO <sub>x</sub> ] <sub>düz</sub> (ppm)	<b>65,27</b>	<b>68,63</b>	<b>59,73</b>	<b>99,04</b>	<b>116,83</b>

## ÖZGEÇMİŞ

1973 yılında Hatay'ın İskenderun ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini İskenderun'da tamamladı. 1998 yılında Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makina Eğitimi Bölümü Otomotiv Anabilim dalından lisans derecesi aldı. 1998–1999 eğitim yılında Bursa Hürriyet Endüstri Meslek lisesinde motor öğretmeni olarak çalıştı. 1998 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Eğitimi Anabilim dalında yüksek lisansa başladı. 2000 yılında Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makina Eğitimi Bölümünde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2001 yılının bahar döneminde yüksek lisansını tamamladı. 2001 yılının güz döneminde aynı anabilim dalında doktora eğitimine başladı. Halen Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesinde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.