

**BUZDOLABI KOMPRESÖRLERİNDE
YAĞLAMA YAĞI-SOĞUTKAN İLİŞKİSİNİN
İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Kim. Müh. Nevzat Serkan YÜZER
(506031018)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 6 Temmuz 2005
Tezin Savunulduğu Tarih : 19 Ağustos 2005**

**Tez Danışmanı : Doç.Dr. Filiz KARAOSMANOĞLU
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Hüsnü ATAKÜL
Yrd.Doç.Dr. Erhan BÖKE**

AĞUSTOS 2005

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın hazırlanmasında, çok değerli fikirleriyle yardımcı olan ve desteğini esirgemeyen değerli hocam Sn. Doç. Dr. Filiz KARAOSMANOĞLU'na teşekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışmanın gerçekleşmesini sağlayan ve destek olan Arçelik Araştırma ve Geliştirme Merkezi'ne, başta Sn. Şemsettin EKSERT, Sn. Fatih ÖZKADI ve Sn. Dr. Hüsnü KERPİÇÇİ'nin şahsında teşekkür ederim.

Deneyisel çalışma sırasındaki yardımlarından dolayı Sn. Fikri ÇAVUŞOĞLU, Sn. Turgay GÖNÜL olmak üzere tüm Arçelik A.Ş. Araştırma ve Geliştirme Merkezi çalışanlarına teşekkür ederim.

Tüm çalışmalarım boyunca verdikleri destekten dolayı başta Sn. Ş. Barış ÜNAL, Sn. Murat ERGÜLER ve Sn. Erdem TURFAN olmak üzere tüm ARGE Yüksek Lisans Öğrencileri'ne teşekkür ederim.

Başta Sn. Serdar KAHYAOĞLU, Sn. Mehmet TOLAY, Sn. Hakan CERİT ve Sn. Neslişah UYAR olmak üzere bu iki yıllık süreçte yardım ve desteklerini esirgemeyen tüm dostlarıma teşekkür ederim.

Son olarak tüm hayatım boyunca her daim yanımda olan her adımında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen sevgili AİLEME teşekkürlerimi borç bilirim

İstanbul, Temmuz, 2005

Nevzat Serkan YÜZER

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	xi
SUMMARY	xii
1. GİRİŞ	1
2. TEORİK ÇALIŞMA	3
2.1. Buzdolabı Kompresörleri	3
2.2. Buzdolabı Kompresör Yağları	6
2.3. Buzdolabı Kompresörlerinde Kullanılan Soğutkanlar	9
2.4. Buzdolabı Kompresör Yağı – Soğutkan İlişkisi	12
2.5. Yağ-Soğutkan Karışımlarının Termodinamik Yapısı	14
2.5.1. Buhar Faz Non-İdealitesi	15
2.5.2. Sıvı Faz Non-İdealitesi	18
2.5.3. Karışım Non-İdealitesi	19
2.6. Karışım Modellenmesi	20
2.6.1. Wilson Eşitliği	22
2.6.2. Karışım Viskozitesinin Modellenmesi	23
2.7. Kaynak Tarama Çalışması	24
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	30
3.1. Deney Sisteminin Hazırlanması	30
3.1.1. Yağ-Soğutkan Karışım Haznesi	32
3.1.2. Pompa ve Sirkülasyon Hattı	36
3.1.3. Viskozimetre	38
3.1.4. Yalıtım Kabini	39
3.1.5. Sıcaklık Kontrolü	39
3.2. Deneysel Çalışma Yöntemi	41

3.2.1.	Seviye Cetveli Kullanılarak Yağdaki Soğutkan Çözünürlüğünün Saptanması	44
3.2.2.	Örnek Toplama Kabı Kullanılarak Yağdaki Soğutkan Çözünürlüğünün Saptanması	45
3.3.	Deney Numunelerinin Özellikleri	46
3.4.	Deney Sistemi ve Yönteminin Kontrolü	46
3.5.	Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi	49
3.5.1.	Mineral Yağ-R600a Çifti Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi	49
3.5.2.	POE-R134a Çifti Sonuçları ve Değerlendirilmesi	52
3.5.3.	Mineral Yağ-R600a ve POE-R134a Çifti Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	56
3.5.4.	Yağ-Soğutkan Karışımlarında Durma Anı Basıncının Çözünürlüğe ve Viskoziteye Etkisinin İncelenmesi	58
4.	MODELLEME ÇALIŞMASI	60
4.1.	Wilson Eşitliği ile Yağdaki Soğutkan Çözünürlüğünün Modellenmesi	60
4.2.	Viskozite Eşitliği ile Karışım Viskozitesinin Modellenmesi	65
4.3.	Mineral Yağ-R600a ve POE-R134a Çifti Modelleme Sonuçlarının Karşılaştırılması	68
5.	SONUÇ	70
6.	KAYNAKLAR	72
	ÖZGEÇMİŞ	74

KISALTMALAR

AB	: Alkil Benzen Yağ
CFC	: Kloroflorokarbon
GWP	: Global Warming Potential
HC	: Hidrokarbon
HCFC	: Hidrokloroflorokarbon
HFC	: Hidroflorokarbon
NRTL	: Non-Random Two Liquid Theory
ODP	: Ozone Depletion Potential
PAG	: Polialkilen Glikol Yağ
PAO	: Polialfaolefin Yağ
PID	: Proportional Integral Derrivative Control
PLC	: Programmable Logical Controller
POE	: Polyol Ester Yağ
RTD	: Resistance Temperature Detector
UNIQUAC	: Universal Quasi Chemical Theory
VI	: Viskozite İndeksi

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1.	Kompresör Yağları ve Karşılaştırılması 7
Tablo 2.2.	R600a Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri 11
Tablo 2.3.	R134a Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri 12
Tablo 2.4.	Bazı Soğutkan Türleri İçin Uygun Yağ Grupları..... 13
Tablo 3.1.	Kullanılan Mineral Yağların Özellikleri 46
Tablo 3.2.	Kullanılan Polyol Ester Yağların Özellikleri 46
Tablo 3.3.	Deney Sonuçlarının Hassasiyeti..... 47
Tablo 3.4.	Soğutkan Şarjı Miktarındaki Değişimin Sonuçlar Üzerindeki Etkisi 47
Tablo 3.5.	Deney Sistemi ve Yağ Üretici Firma Tarafından Elde Edilen Sonuçlarının Karşılaştırılması..... 48
Tablo 3.6.	Yağ-Soğutkan Çiftleri İçin Buhar Basıncı ve Yağ içinde Soğutkan Çözünürlüğü Değerlerinin Karşılaştırılması 56
Tablo 3.7.	Yağ-Soğutkan Çiftleri İçin Viskozite Değişiminin Buhar Basıncına Etkisi 57
Tablo 3.8.	Yağ-Soğutkan Çiftlerinde Yağ içinde Soğutkan Çözünürlüğü ve Sıcaklığın Karışım Viskozitesine Etkisi 57
Tablo 4.1.	MineralYağ-1 – R600a Çifti İçin Wilson Eşitliği İle Hesaplanan Yağdaki Soğutkan Çözünürlüğü ve Deneysel Sonuçlarla Karşılaştırılması 63
Tablo 4.2.	MineralYağ-2 – R600a Çifti İçin Wilson Eşitliği İle Hesaplanan Yağdaki Soğutkan Çözünürlüğü ve Deneysel Sonuçlarla Karşılaştırılması 63
Tablo 4.3.	POE-1 – R134a Çifti İçin Wilson Eşitliği İle Hesaplanan Yağdaki Soğutkan Çözünürlüğü ve Deneysel Sonuçlarla Karşılaştırılması..... 64
Tablo 4.4.	POE-2 – R134a Çifti İçin Wilson Eşitliği İle Hesaplanan Yağdaki Soğutkan Çözünürlüğü ve Deneysel Sonuçlarla Karşılaştırılması..... 64
Tablo 4.5.	Mineral Yağ-1 – R600a Çifti İçin Viskozite Eşitliği İle Hesaplanan Karışım Viskozitesi ve Deneysel Sonuçlarla Karşılaştırılması..... 66
Tablo 4.6.	Mineral Yağ-2 – R600a Çifti İçin Viskozite Eşitliği İle Hesaplanan Karışım Viskozitesi ve Deneysel Sonuçlarla Karşılaştırılması..... 66
Tablo 4.7.	POE-1 – R134a Çifti İçin Viskozite Eşitliği İle Hesaplanan Karışım Viskozitesi ve Deneysel Sonuçlarla Karşılaştırılması..... 67
Tablo 4.8.	POE-2 – R134a Çifti İçin Viskozite Eşitliği İle Hesaplanan Karışım Viskozitesi ve Deneysel Sonuçlarla Karşılaştırılması..... 67
Tablo 4.9.	Yağ-Soğutkan Çiftleri İçin Eşitlik Performansları..... 68

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1	: Buhar Sıkıştırılmalı Soğutma Çevrimi 3
Şekil 2.2	: Hermetik-Pistonlu Kompresör Yapısı 4
Şekil 2.3	: Stribeck Eğrisi 6
Şekil 2.4	: R600a Moleküler Yapısı..... 11
Şekil 2.5	: R134a Moleküler Yapısı..... 12
Şekil 2.6.	: Mineral Yağ-R600a Çifti İçin “Daniel Chart” Örneği 14
Şekil 2.7	: Grebner Deney Sistemi..... 25
Şekil 2.8	: Martz ve Jacobi Deney Sistemi 27
Şekil 2.9	: Martz ve Jacobi Deney Sonuçları-1..... 28
Şekil 2.10	: Martz ve Jacobi Deney Sonuçları-2 28
Şekil 2.11	: Martz ve Jacobi Tarafından Kullanılan Model Performansları 29
Şekil 3.1	: Deney Sisteminin Şematik Gösterimi 31
Şekil 3.2	: Deney Sisteminin Fotoğrafı..... 31
Şekil 3.3	: Karışım Haznesi Flanşları 32
Şekil 3.4	: Karışım Haznesi Üst Flanşı 33
Şekil 3.5	: Basınç Sensörü Kalibrasyon Eğrisi 34
Şekil 3.6	: Karışım Haznesi Üzerindeki Isıtıcılar 34
Şekil 3.7	: Yağ-Soğutkan Karışım Haznesi 35
Şekil 3.8	: Seviye Cetveli Kalibrasyon Eğrisi..... 35
Şekil 3.9	: Sirkülasyon Hattının Hazneye Bağlantısı..... 37
Şekil 3.10	: Pompa 37
Şekil 3.11	: Örnek Toplama Kabı 38
Şekil 3.12	: Viskozimetre Sensörü..... 39
Şekil 3.13	: Yalıtım Kabini. 40
Şekil 3.14	: Isıtıcı ve RTD’lerin Yerleşimi 40
Şekil 3.15	: PLC 41
Şekil 3.16	: Deneysel Çalışma Yöntemi Akım Şeması 42
Şekil 3.17	: Mineral Yağ-1 – R600a Çifti İçin Değişen Sıcaklıklarda Yağ İçinde Soğutkan Çözünürlüğü – Buhar Basıncı İlişkisi 50
Şekil 3.18	: Mineral Yağ-1 – R600a Çifti İçin Değişen Sıcaklıklarda Yağ İçinde Soğutkan Çözünürlüğü-Karışım Viskozitesi İlişkisi..... 50
Şekil 3.19	: Mineral Yağ-2 – R600a Çifti İçin Değişen Sıcaklıklarda Yağ İçinde Soğutkan Çözünürlüğü – Buhar Basıncı İlişkisi 51
Şekil 3.20	: Mineral Yağ-2 – R600a Çifti İçin Değişen Sıcaklıklarda Yağ İçinde Soğutkan Çözünürlüğü-Karışım Viskozitesi İlişkisi..... 52
Şekil 3.21	: POE-1 – R134a Çifti İçin Değişen Sıcaklıklarda Yağ İçinde Soğutkan Çözünürlüğü-Karışım Viskozitesi İlişkisi..... 53
Şekil 3.22	: POE-1 – R134a Çifti İçin Değişen Sıcaklıklarda Yağ İçinde Soğutkan Çözünürlüğü-Karışım Viskozitesi İlişkisi..... 54
Şekil 3.23	: POE-2 – R134a Çifti İçin Değişen Sıcaklıklarda Yağ İçinde Soğutkan Çözünürlüğü-Karışım Viskozitesi İlişkisi..... 55

Şekil 3.24	: POE-2 – R134a Çifti İçin Değişen Sıcaklıklarda Yağ İçinde Soğutkan Çözünürlüğü-Karışım Viskozitesi İlişkisi.....	55
Şekil 3.25	: Yağ-Soğutkan Karışımında Zamana Bağlı Olarak Buhar Basıncının Değişimi (Karıştırma Yok).....	59

SEMBOL LİSTESİ

a_i	: Aktivite
a_{12}, a_{12}	: Wilson eşitliği deneysel katsayıları
f	: Fugasite
g	: Gibbs serbest enerjisi
g^E	: Gibbs aşırılık enerjisi
h	: Entalpi
k	: Viskozite modeli deneysel katsayısı
M	: Molar ağırlık
$m_{S(BUHAR)}$	: Deney sisteminde buhar fazındaki soğutkan kütlesi
$m_{S(SIVI)}$	: Deney sisteminde sıvı fazındaki soğutkan kütlesi
$m_{S(T)}$	: Deney sistemindeki toplam soğutkan kütlesi
$m_{YAĞ}$	: Deney sistemindeki toplam yağ kütlesi
n	: Mol sayısı
P	: Basınç
P_s	: Doygun sıvı basıncı
$P_{i,S}$	: i bileşeninin doyunluk basıncı
P_c	: Kritik basınç
Pe	: Poynting etkisi
R	: Gaz Sabiti
s	: Entropi
T	: Sıcaklık
T_c	: Kritik sıcaklık
T_{SAT}	: Doygunluk sıcaklığı
V	: Hacim
V_{SIVI}	: Deney sisteminde sıvı faz hacmi
V_T	: Deney sistemi toplam hacmi
v	: Molar hacim
$v_{i,L}$	: i bileşeninin sıvı faz molar hacmi
w	: Kütle fraksiyonu
x	: Sıvı faz mol fraksiyonu
x_{ij}	: i bileşeninin j bileşeni etrafındaki lokal mol bileşimi
y	: Buhar faz mol fraksiyonu
z_c	: Sıkıştırma faktörü
γ_i	: Aktivite katsayısı
Λ_{ij}	: Etkileşim parametresi
λ_{ij}	: Etkileşim enerjisi
Φ_i	: Fugasite katsayısı
$\Phi_{i,S}$	: Doygunluk durumunda fugasite katsayısı
μ	: Kinematik viskozite
μ_{mix}	: Karışım kinematik viskozitesi
ρ_{BUHA}	: Deney sisteminde buhar fazındaki soğutkan yoğunluğu
ρ_s	: Deney sisteminde yağ-soğutkan karışımının yoğunluğu

BUZDOLABI KOMPRESÖRLERİNDE YAĞLAMA YAĞI - SOĞUTKAN İLİŞKİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Soğutma endüstrisinde ve ev tipi buzdolaplarında yaygın olarak kullanılan buhar sıkıştırımlı soğutma çevriminde buhar fazındaki soğutucu akışkanın sıkıştırılması bir kompresör yardımıyla yapılmaktadır. Buzdolabı kompresörlerinde soğutkan ve kompresör yağı üretim sırasında doğrudan kompresör muhafazası içine şarj edilmekte ve bu nedenle sürekli olarak birbirleriyle temas halinde olmaktadır. Bu temas neticesinde özellikle kompresör çalışma esnasındaki hareketli parçaların da etkisiyle yağ ve soğutkan bir karışım oluşturmaktadır. Bu karışım temelde soğutkanın yağ içinde çözünmesini ifade etmektedir. Oluşan yağ-soğutkan karışımının özellikleri kompresör tasarımı ve soğutma çevrimi performansı konusunda oldukça önemlidir. Yağın içinde çözünen soğutkan miktarının bilinmesi ve çözünen soğutkana bağlı olarak oluşan yağ-soğutkan karışımının viskozitesinin belirlenmesi kompresör hareketli parçalarının tasarlanması ve uygun malzeme seçimi gibi mekanik verimi doğrudan ilgilendiren süreçlerde en önemli girdilerden biri olmaktadır. Bu çalışmada kompresör içi yağ-soğutkan karışımlarının yağdaki soğutkan çözünürlüğü ve karışım viskozitesi bilgilerinin incelenebileceği bir deney sistemi tasarlanmış, imalatı, montajı ve işletmeye alınması gerçekleştirilmiştir. Deney sistemi ile farklı R600a soğutkanı-mineral kompresör yağı ve R134a soğutkanı polyol ester kompresör yağı çiftlerinin yağdaki soğutkan çözünürlüğü ve karışım viskozitesi bilgileri elde edilmiştir. Deney sonuçları ile farklı çalışma şartlarındaki kompresörler için soğutkan çözünürlüğü ve karışım viskozitesi bilgileri belirlenebilmektedir. Ayrıca yağdaki soğutkan çözünürlüğü ve karışım viskozitesi bilgileri teorik yöntemlerle de belirlenmiştir. Yağdaki soğutkan çözünürlüğünün hesaplanması için Wilson Eşitliği, karışım viskozitesinin hesaplanması için ise literatürde yer alan bir eşitlik kullanılmıştır. Teorik sonuçların deneysel sonuçlarla karşılaştırılması neticesinde kullanılan eşitliklerin oldukça iyi sonuç verdiği kanaatine varılmıştır. Mineral yağ-R600a ve POE-R134a çiftleri için kullanılan bu eşitlikler için belirlenen deneysel katsayılar farklı özelliklerdeki mineral yağ-R600a ve POE-R134a çiftlerinde kullanılabilmekte ve böylelikle uzun süreli deneyler yapılmadan yağ-soğutkan çiftleri için soğutkan çözünürlüğü ve karışım viskozitesi bilgilerinin elde edilmesi mümkün olacaktır. Bu tez çalışması neticesinde; buzdolabı kompresörlerinde hareketli parçaların tasarımında kullanılacak yağ-soğutkan karışım bilgilerinin elde edildiği deneysel ve teorik yöntemler oluşturulmuştur. Tasarlanan deney sistemi ile; Türkiye’de yapılamayan, yurtdışında ise sadece birkaç enstitü tarafından bir kompresör yağı için yaklaşık 10,000 Avro bedel karşılığında yapılan yağ-soğutkan karışımı deneyleri yapılabilmektedir. Bu tez çalışması neticesinde geliştirilen deney sistemi ve deneysel çalışma yöntemi; Arçelik A.Ş. Araştırma ve Geliştirme laboratuvarlarında aktif olarak kullanılmakta ve Türk sanayisine hizmet vermektedir.

THE INVESTIGATION OF RELATION BETWEEN LUBRICATING OIL AND REFRIGERANT IN REFRIGERATOR COMPRESSORS

SUMMARY

Compressors are used for the compression of the refrigerant in vapor compression refrigeration cycle, which has a wide application area in refrigeration industry. For these compressors, oil and refrigerants are injected to compressor case at production line, so that they can interact with each other. This interaction effect and the rotational movement of compressor parts form a mixture that consists of oil and refrigerant. This mixture is formed because of the dissolution of refrigerant in oil. Some properties of refrigerant-oil mixtures are very important for the design of compressors and performance of the refrigeration cycle. Among these properties, mixture viscosity and the amount of refrigerant that is dissolved in oil are two of the vital parameters in the design of compressor's moving parts. In this study, an experimental setup that can be used to obtain refrigerant mass fraction and mixture viscosity data is designed and constructed. By using this experimental setup, various R600a mineral compressor oil and R134a polyol ester compressor oil mixtures are examined. With the results, refrigerant fraction and mixture viscosity values can be easily determined for various operating conditions of compressors. On the other hand, some theoretical studies are performed to obtain same refrigerant fraction and mixture viscosity data. To obtain refrigerant fraction and mixture viscosity, Wilson Equation and a viscosity model from literature are used respectively. Model performances are also investigated. The models' results are in good correlation with experimental results proving that both of the equation performances are satisfactory. The experimental parameters in these equations that are obtained for mineral oil-R600a and POE-R134a mixtures in this study, can be used for various kinds of mineral oil-R600a and POE-R134a mixtures. Application of the models provides refrigerant fraction and viscosity data to be obtained with theoretical approaches without performing any long-lasting experimental work. As a result of this study, experimental and theoretical methods that can be used to derive information on oil-refrigerant mixtures, which are used in the design for mobile pieces of refrigerator compressors, are created. Oil-refrigerant mixture experiments, which cannot be performed in Turkey and can only be performed in a few institutes abroad with a price of 10,000 euros for just one compressor oil, can now be performed by this designated experimental setup. This experimental setup and method that are developed as a result of this thesis study are currently being used in Arçelik A.Ş. R&D Laboratories and serves for the Turkish industry

1. GİRİŞ

Tüm soğutma endüstrisinde ve dolayısıyla buzdolaplarında buhar sıkıştırılmalı soğutma çevrimi en yaygın olarak kullanılan soğutma sistemidir. Bu sistemlerde buhar fazındaki soğutucu akışkanın sıkıştırılması bir kompresör yardımıyla yapılmaktadır.

Günümüzde buzdolaplarında genellikle hermetik tip pistonlu kompresörler kullanılmaktadır. Hermetik kompresörlerde mekanik aksam ile motor grubu bir arada ve tek bir muhafaza içinde yer almaktadır. Bu kompresörlerde motorun dönme hareketi krank-biyel mekanizması yardımıyla pistonun gel-git hareketi yapmasını ve soğutkanın sıkıştırılmasını sağlamaktadır. Soğutkan ve kompresör hareketli parçalarının yağlanması amacıyla kullanılan kompresör yağı üretim sırasında doğrudan kompresör muhafazası içine şarj edilmekte ve bu nedenle sürekli olarak birbirleriyle temas halinde olmaktadır. Bu temas neticesinde özellikle kompresör çalışma esnasındaki hareketli parçaların da etkisiyle yağ ve soğutkan bir karışım oluşturmaktadır. Bu karışım temelde soğutkanın yağ içinde çözünmesini ifade etmektedir. Oluşan yağ-soğutkan karışımının özellikleri kompresör tasarımı ve soğutma çevrimi performansı konusunda oldukça önemlidir. Yağın içinde çözünen soğutkan miktarının bilinmesi ve çözünen soğutkana bağlı olarak oluşan yağ-soğutkan karışımının viskozitesinin belirlenmesi özellikle kompresör hareketli parçalarının tasarlanması ve uygun malzeme seçimi gibi mekanik verimi doğrudan ilgilendiren süreçlerde en önemli girdilerden biri olmaktadır.

Yağ-soğutkan karışımlarının yağdaki soğutkan çözünürlüğü ve karışım viskozitesi bilgileri özel olarak geliştirilen deney sistemleri ile elde edilebilmektedir. Deneysel yöntemlerin dışında Wilson Eşitliği gibi lokal bileşim modelleri ve Flory-Huggins Polimer Teorisi gibi farklı teorik yöntemlerle yağdaki soğutkan çözünürlüğü modellenebilmektedir. Karışım viskozitesinin belirlenmesi amacıyla da literatürde bazı eşitliklere rastlanmaktadır. Ancak literatürde yer alan az sayıdaki deneysel ve teorik çalışmalar çoğunlukla kompresörlerde kullanımı giderek kısıtlanan CFC (kloroflorokarbon) ve daha az sayıda da HFC (hidroflorokarbon) grubu soğutkanlara

yönelik yapılmıştır. Günümüzde çevresel etki konusunda büyük avantaja sahip HC (hidrokarbon) soğutkanlar ve bu gruptan özellikle R600a (izobütan) soğutkanının kullanımı, endüstriye önemi giderek artmaktadır. Bu orijinal konu araştırmaya çok açık bir alan olmasına karşın, literatürde bu soğutkanla yapılmış çalışmalar bulunmamaktadır.

Bu çalışmada buzdolabı kompresörlerinde hareketli parçaların tasarımı için önemli girdiler olan kompresör içi yağ-soğutkan karışımlarının yağdaki soğutkan çözünürlüğü ve karışım viskozitesi bilgilerinin incelenebileceği bir deney sisteminin tasarlanması, montajı, imalatı ve işletmeye alınması gerçekleştirilmiştir. Deney sisteminin işletmeye alınması ile Türkiye’de yapılamayan, yurtdışında ise sadece birkaç enstitü tarafından bir kompresör yağı için yaklaşık 10,000 Avro bedel karşılığında yapılabilen yağ-soğutkan karışımı deneyleri yapılabilmektedir. Deney sistemi kullanılarak farklı R600a soğutkanı-mineral kompresör yağı ve R134a (1,1,1,2 tetrafloroetan) soğutkanı-POE (polyol ester) kompresör yağı çiftlerinin yağdaki soğutkan çözünürlüğü ve karışım viskozitesi özelliklerinin belirlenmiştir. Aynı çiftler için yağdaki soğutkan çözünürlüğü ve karışım viskozitesi bilgileri Wilson Eşitliği ile bir viskozite eşitliği kullanılarak teorik olarak da hesaplanmış ve teorik sonuçlar ile deneysel sonuçlar karşılaştırılarak kullanılan eşitliklerin performansı değerlendirilmiştir. Böylelikle; farklı çalışma şartlarındaki buzdolabı kompresörleri için de kullanılabilecek yağ-soğutkan karışım bilgilerinin elde edilmesi amacıyla oluşturulan deneysel ve teorik yöntemler sunulmuş ve modelleme çalışması ile literatürde mevcut olmayan, R600a soğutkanı için kullanılabilecek teorik eşitlikler ve ampirik katsayılar ilk kez tanımlanmıştır.

2. TEORİK ÇALIŞMA

Bu bölümde buzdolabı kompresörleri, buzdolabı kompresörlerinde kullanılan yağlama yağları (kompresör yağları) ve soğutkanlar, kompresör yağı ve soğutkan ilişkisinin önemi, yağ-soğutkan karışımlarının termodinamik yapısı, karışım özelliklerinin modellenmesi ve konu ile ilgili literatür taraması sonuçları sunulmaktadır.

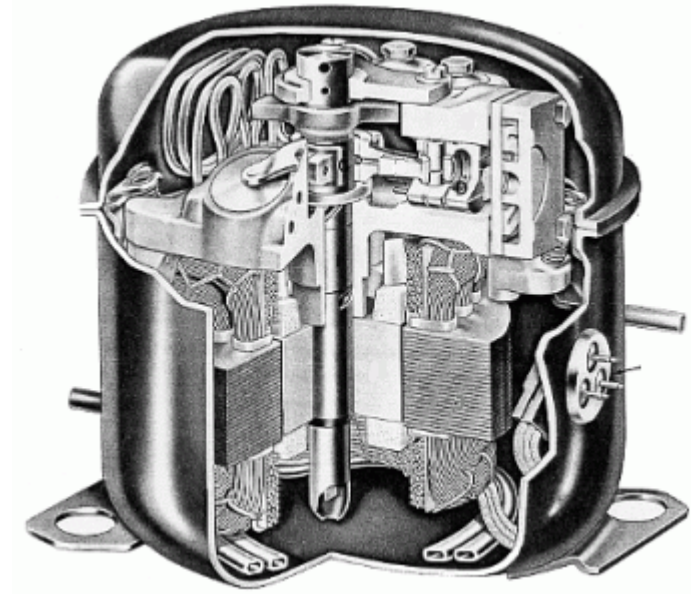
2.1. Buzdolabı Kompresörleri

Ev tipi buzdolaplarında soğutma prosesi buhar sıkıştırımlı soğutma çevrimi ile açıklanmaktadır. Buhar sıkıştırımlı soğutma çevriminde yüksek basınca sahip soğutucu akışkan yoğusturucuda (kondenser) buhar fazından sıvı fazına geçerken dış ortama ısı atmaktadır. Yoğusturucudan çıkan akışkanın basıncı genleştirici yardımıyla düşürülmekte ve sıcaklığı azalmaktadır. Genleştiriciden sıcaklığı ve basıncı düşürülmüş olarak çıkan soğutucu akışkan buharlaştırıcıya (evaporatör) girerek ortamdaki ısı çekmekte ve tekrar buhar fazına geçmektedir. Buhar fazındaki soğutucu akışkanın basıncının artırılması amacıyla kompresör kullanılmaktadır [1]. Buhar sıkıştırımlı soğutma çevrimi şeması Şekil 2.1’de verilmektedir [2].



Şekil 2.1 Buhar Sıkıştırımlı Soğutma Çevrimi [2]

Buzdolaplarında kullanılan kompresörlerin tamamına yakını hermetik kompresörlerdir. Hermetik kompresörlerde motor ve hareketli parçalar (krank, piston) tek bir gövde içinde bulunmaktadır [1]. Soğutkan ve kompresör yağı kompresör muhafazası içinde birlikte yer almakta ve sürekli etkileşim halinde bulunmaktadır. Şekil 2.2’de buzdolaplarında kullanılan hermetik-pistonlu bir kompresörün iç yapısı görülmektedir [3].



Şekil 2.2 Hermetik-Pistonlu Kompresör Yapısı [3]

Kompresörlerde yağlama işlemi ve dolayısıyla kompresör yağları kompresör performansında önemli yer tutmaktadır. Kompresör çalışma esnasında kompresör yağı ve yağlama işleminin önemi şu şekilde sıralanabilmektedir:

- Hareketli parçaların yağlanması (kaydırmalı yataklar, basmalı yataklar, düzlemsel yataklar),
- Sürtünme nedeniyle ısınan parçaların soğutulması, dolayısıyla kompresör muhafazasının soğutulması nedeniyle termodinamik verimin (soğutkanın sıkıştırılma verimi) artması,
- Soğutkanın sıkıştırılması esnasında piston çevresindeki sızıntının engellenmesi,
- Kompresör çalışırken hareketli parçalar nedeniyle oluşan gürültünün azaltılması,
- Motor ve hareketli parçalar arasında elektrik yalıtımını sağlaması [4, 5].

Soğutucu cihazlarda harcanan toplam enerjinin yaklaşık yüzde doksanını kompresörler tüketmektedir. Daha düşük enerji sarfiyatlı buzdolapları için kompresörlerdeki enerji kayıplarının azaltılması gerekmektedir. Bu nedenle yağlama işlemi enerji kayıplarının azaltılması için oldukça önemlidir [1].

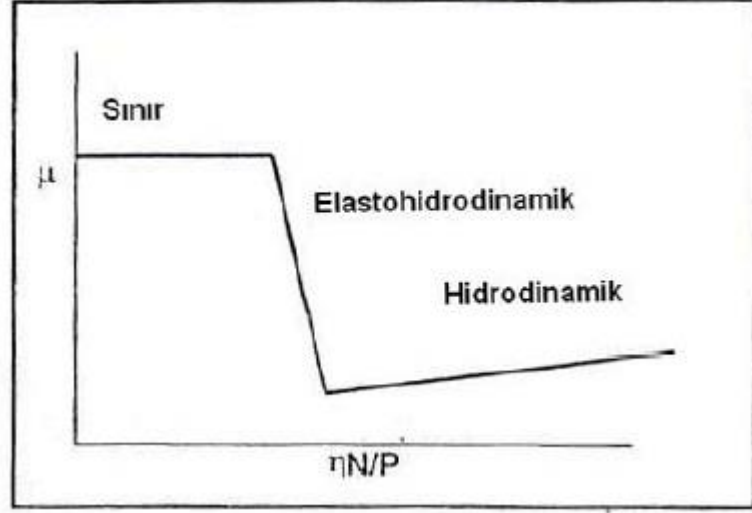
Kompresörler genellikle hidrodinamik ve elastohidrodinamik yağlama koşullarında, nadiren de sınır yağlama koşullarında çalışmaktadır. Hidrodinamik ve elastohidrodinamik koşullarda yağlama genellikle sadece uygun yağın seçimi ile başarılı bir biçimde sağlanabilirken, sınır yağlama koşullarında yağa aşınma önleyici katkı maddelerinin eklenmesi gerekebilmektedir [6].

Hidrodinamik yağlama koşullarında hareketli iki yatağın arasında kalın bir yağ filmi bulunmaktadır. Böyle bir yağ filmi oluşması nedeniyle yatak yüzeylerindeki pürüzler birbirleriyle temas etmemekte ve aşınma olmamaktadır. Hidrodinamik yağlama koşulunun devamlılığının sağlanmasında yağ filminin kalınlığı son derece önemlidir. Yağ filminin kalınlığı yatakların hareket hızı, uygulanan yük ve yağ viskozitesine bağlı olarak değişmektedir.

Elastohidrodinamik yağlama koşullarında yatak yüzeyleri elastik deformasyona uğramaktadır. Bu durum genellikle temas geometrisinin çizgisel veya noktasal olmasıyla meydana gelmektedir. Bu gibi şartlarda temas geometrisi nedeniyle yağ filminin basıncı yüksek değerlere ulaşabilmektedir. Böylelikle yağın viskozitesinin çok yüksek mertebelere ulaşması ve yağ filminin bir sıvıdan çok katı gibi davranması söz konusu olabilmektedir.

Çok yüksek temas basıncı ve düşük yatak hareketi hızlarının görülmesi durumunda ince bir elastohidrodinamik yağ filminin oluşması dahi mümkün olamamakta ve pürüzler arasında doğrudan bir temas oluşabilmektedir. Sınır yağlama koşullarının olduğu bu durumda şiddetli aşınmalar görülebilmektedir. Böyle bir rejimde sürtünme katsayısı yağ viskozitesinden çok pürüzlerin deformasyonu için gerekli enerjiye bağlıdır [7,8].

Yağlama rejimine bağlı olarak sürtünme katsayısı ile hareket hızı, yağ viskozitesi ve yatak yükü arasındaki ilişki Stribeck Eğrisi ile verilmektedir (Şekil 2.3). Eğriden de görülebileceği gibi kompresörler için optimum yağlama şartı olan hidrodinamik yağlama koşulunda sürtünme katsayısı yağ viskozitesinin düşmesi ile azalmaktadır [9].



Şekil 2.3 Stribeck Eğrisi (μ : Sürtünme katsayısı, η : Viskozite, N: Hız, P: Yük) [9]

2.2. Buzdolabı Kompresör Yağları

Soğutma kompresörlerinde kullanılan yağlama yağları sadece yağlama amaçlı olarak kullanılan geleneksel yağlama yağlarından farklı bir çok özelliğe sahip olmaktadır. Önemli bir farklılık; kompresörden buzdolabı çevrimine basılan soğutkan ile birlikte bir miktar yağın çevrime kaçması mümkün olabileceğinden yağın düşük sıcaklık özelliklerinin iyi olması gerekliliğidir. Kompresör yağının düşük sıcaklıkta yeterli akıcılığa sahip olmaması özellikle yoğuşturucudaki ısı transferini olumsuz yönde etkileyebilecek ve çoğu buzdolabında yüksek basınçlı soğutkanı genişletmek için kullanılan kapileri boruyu tıkamasına sebep olabilecektir. Ayrıca kompresör yağının muhafaza içinde soğutkan ile etkileşim halinde olması nedeniyle yağ soğutkan uyumu dikkate alınmalıdır. Yağ ile soğutkanın homojen bir karışım oluşturması; kompresör içinde gerekli karışım oranı sayesinde uygun yağlayıcı viskozitesinin oluşması ve buzdolabı çevrimine kaçan yağın kompresöre geri sürüklenmesi açısından oldukça önemlidir [10].

Kompresör yağının yağlayıcılık fonksiyonu düşünüldüğünde en önemli parametre kuşkusuz yağ viskozitesi olmaktadır. Yağın kompresörde soğutkan ile birlikte hareket etmesi nedeniyle kompresör çalışma esnasındaki yağlayıcı (yağ-soğutkan karışımı) viskozitesi yağın belirtilen viskozitesinden daha düşük olmaktadır. Kompresör mekanik kaybının azaltılması amacıyla; hidrodinamik yağlama

koşulunun geçerli olduğu düşünüldüğünde Stribeck Eğrisinden de (Şekil 2.3) hatırlanacağı gibi, gelişmiş buzdolabı kompresörlerinde kullanılan yağların olabildiğince düşük viskoziteye sahip olması amaçlanmaktadır. Kullanılacak yağın viskozitesi belirlenirken kompresör yataklarında hidrodinamik yağlamanın sağlanabilmesi belirleyici parametre olmaktadır. Daha düşük viskoziteli yağ kullanımı dolayısıyla mekanik kayıpların azaltılması ise yatak tasarımlarının iyileştirilmesi ile mümkün olmaktadır [6].

Kompresör yağı dolayısıyla kompresör performansına etki eden diğer önemli yağ özellikleri arasında kimyasal-termal dayanıklılık ve malzeme uyumu öne çıkmaktadır. Kompresör yağının çalışma sıcaklıklarında (65-70°C) yapısının bozulmadan yağlayıcılık özelliklerinin devam etmesi istenmektedir. Ayrıca kompresör yapısında bulunan plastik ve metal malzemelerin yağ ile etkileşime girmemeleri gerekmektedir. Malzeme ile yağ ve soğutkan uyumu Sealed Tube (kapalı cam tüp) deneyleri ile test edilmektedir. Test yönteminde; özel bir cam tüp içerisine konan malzeme numuneleri yağ ve soğutkan eklenerek yüksek sıcaklık altında (yaklaşık 150 °C) belirli zaman (yaklaşık bir ay) sonunda malzeme yapılarındaki olası değişiklikler gözlenmektedir [11]. Kompresörlerde kullanılan genel yağ tipleri ve karşılaştırması Tablo 2.1’de verilmektedir [6].

Tablo 2.1 Kompresör Yağları ve Karşılaştırılması [6]

Özellikler	Parafinik Mineral Yağ	Naftenik Mineral Yağ	Polialfaolefin (PAO)	Alkil Benzen (AB)	Polialkilen Glikol (PAG)	Polyol Ester (POE)
Kimyasal Stabilite	iyi	iyi	mükemmel	çok iyi	iyi	iyi
Termal Stabilite	iyi	iyi	çok iyi	çok iyi	iyi	çok iyi
Uyumluluk (Polar Soğutkan İle)	zayıf	iyi	zayıf	çok iyi	mükemmel	mükemmel
Uçuculuk	iyi	orta	mükemmel	iyi	iyi	mükemmel
Düşük Sıcaklıkta Akışkanlık	zayıf	iyi	çok iyi	iyi	iyi	çok iyi
Viskozite-Sıcaklık	iyi	orta	iyi	orta	iyi	çok iyi
Hidrolik Stabilite	çok iyi	çok iyi	mükemmel	iyi	iyi	orta
Fiyat (Birim)	1	2	2	2	2	2

Kompresör yağı performansına etki eden önemli parametrelerden biri de katkı maddelerinin kullanılmasıdır. Özellikle petrol kökenli doğal hidrokarbon yağlar

(mineral kompresör yağları) sınır yağlama şartları gibi zor şartlarda yeterli performansı gösterememektedirler. Viskozite-sıcaklık karakteristikleri, yaşlanma ve oksidasyon stabiliteleri gibi bazı iyileştirmeler üretim kademelerindeki modifikasyonlarla gerçekleştirilebilse de çoğu zaman bu işlemler yetersiz kalmaktadır. Bu sebeple yağlama yağlarının dolayısıyla kompresör yağlarının mevcut performanslarını arttırmak üzere katkı maddelerinin eklenmesi uzun yıllardan beri uygulanmaktadır. Genel olarak kompresör yağlarında kullanılabilen katkı maddeleri (katıklar) aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir [12]:

- Aşınma Önleyici Katkı Maddeleri ve Yüksek Basınç Ajanları: Metal yüzeylerle reaksiyona girerek film oluşturmaktadır. Çoğu aşınma önleyici katkı maddesi ve yüksek basınç ajanı kükürt, klor, fosfor, bor ya da bu elementlerin kombinasyonlarından oluşmaktadır.
- Sürtünme Azaltıcı ve Gürültü Azaltıcı Katkı Maddeleri: Polar gruplarıyla metal yüzeye, hidrokarbon gruplarıyla da yağa tutunarak korozyon ve pasa karşı koruyucu bir yağ filmi oluşturmaktadır. Yağ alkoller, amidler ve asitleri bunlara örnektir.
- Viskozite (VI: Viskozite İndeksi) Geliştirici Katkı Maddeleri: Viskozite geliştirici katkı maddesi olarak kullanılan polimerler yüksek sıcaklıklarda yağ yoğunluğunu arttırarak viskozite kaybını engellemektedir.
- Dispersanlar: Yağ içindeki çözünmeyen oksidasyon ürünlerini ve kirlilikleri uzaklaştıran katkı maddeleridir. Alkenilsüksinimit, süksinat esterleri, yüksek molekül ağırlıklı aminler, Mannich bazlar ve fosfonik asit türevleri dispersan olarak kullanılabilmektedir.
- Oksidasyon İnhibitörleri: Oksidasyon prosesinin kademelerine etki ederek oksidasyon işlemini durdurmaktadır. Çinko dialkil ditiofosfatlar, organik ve polisülfidler, fenol sülfidler, fenoller, aromatik aminler yaygın oksidasyon inhibitörleridir.
- Akma Noktası Düşürücü Katkı Maddeleri: Yağ içindeki wax kristallerini modifiye ederek yağ akışkanlığının düşük sıcaklıklarda da sürmesini sağlamaktadır. Polimetakrilatlar, polifümeratlar en yaygın akma noktası düşürücü katkı maddeleridir.

- Köpük Önleyici Katkı Maddeleri: Yağlarda köpük oluşumunu engelleyen katkı maddeleridir. Bu amaçla kullanılan kimyasallar özellikle silikon polimerleri ve organik polimerler (alkil metakrilatlar) dir.

Yukarıda sıralanmış katkı maddelerinin hepsi özel durumlarda kompresör yağlarında kullanılabilmektedir. Ancak kompresör yağlarında en yaygın kullanıma sahip katkı maddeleri aşınma önleyici ve köpük önleyici katkı maddeleridir. Kompresör çalışma sırasında oluşabilecek sınır yağlama koşullarında aşınma önleyici katkı maddesinin kullanımı meydana gelebilecek aşınmaların önüne geçilmesi ve kompresör ömrünün arttırılması açısından oldukça önemlidir. Ayrıca soğutkan varlığı nedeniyle yağda köpürme gözlenebilmekte ve bu nedenle yağlama işleminin etkinliği bozulabilmektedir. Uygun köpük önleyici katkı maddelerinin kullanımı bu problemin ortadan kaldırılmasında etkili olmaktadır.

2.3. Buzdolabı Kompresörlerinde Kullanılan Soğutkanlar

Buhar sıkıştırmalı soğutma çevrimlerinde ısı transferini yapan ara maddeler “soğutucu akışkan” ya da daha kısaltılmış şekliyle “soğutkan” olarak adlandırılmaktadır. Isının bir ortamdan alınıp başka bir ortama taşınmasında yararlanılan soğutkanlar ısı transferini sıvı fazdan buhar fazına (evaporatör bölgesi) ve buhar fazından sıvı fazına (kondenser bölgesi) geçerek sağlamaktadırlar. Genel olarak bir soğutkanda aranması gereken temel özellikler şunlardır [13]:

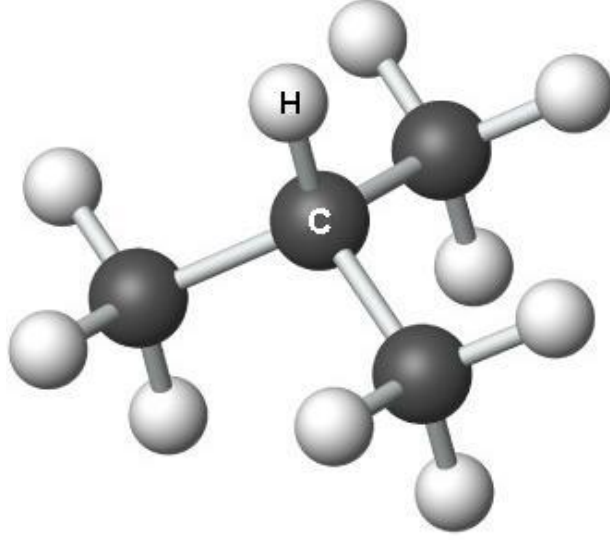
- Daha az bir enerji sarfıyatı ile daha çok soğutma elde edilmesi
- Soğutkanın buharlaşma ısısı yüksek olması (daha az soğutkan akışı)
- Evaporatörde basıncın mümkün olduğu kadar yüksek olması
- Kondenser basıncının düşük olması
- Viskozite ve yüzey geriliminin düşük olması
- Kompresör yağları ve soğutma çevrimindeki malzemeler ile reaksiyona girmemesi
- Kompresör yağlarında çözünmesi
- Soğutma çevriminde bulunmaması gereken nem ile reaksiyona girmemesi

- Çalışma şartlarındaki basınç ve sıcaklık limitlerinde dahi ayrışıp çözülmemesi, kararlı olması ve özelliklerini koruması.

Yakın zamana kadar CFC grubu soğutkanlar buzdolaplarında en yaygın olarak kullanılan soğutkanlardı. CFC ile yaygın kullanıma sahip bir başka soğutkan grubu olan HCFC soğutkanlarının kullanımı yapılarındaki klorun ozon tabakasına verdiği zararlardan ve oluşturdıkları sera etkisi nedeniyle 1987 yılında imzalanan Montreal protokolü çerçevesinde kısıtlanmıştır.

CFC türü soğutkanların çevreye verdiği zararların anlaşılmasından sonra HFC türü soğutkanların kullanımı gündeme gelmiştir. HFC türü soğutkanlarda ise en yaygın kullanıma sahip soğutkan R134a'dır. HFC türü soğutkanlar ozon tabakasına zarar vermemekte ancak içerdikleri flor nedeniyle sera etkisine sebep olmaktadır. Bu soğutkanların kullanımı da 1997 yılında imzalanan Kyoto Protokolü ile sınırlandırılmıştır. [3,13]. Alternatif soğutkan arayışı ışığında buzdolabı ve kompresör üreticilerin tercihi HC türü soğutkanlar ve özellikle R600a soğutkanının kullanımı yönünde olmuştur. Bugün özellikle gelişmiş ülkelere satış yapan bir çok üretici firma kompresörlerinde dolayısıyla buzdolaplarında R134a ve R600a soğutkanı kullanmaktadır.

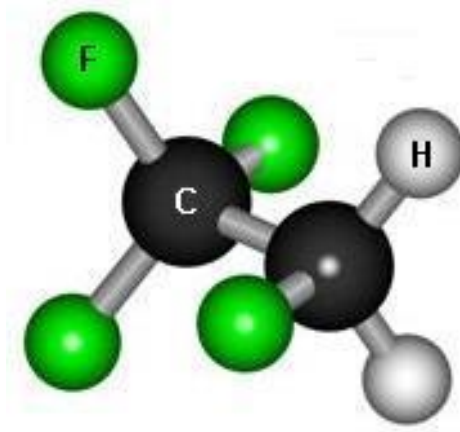
R600a soğutkanının ekolojik yönden HFC ve CFC türü soğutkanlara göre büyük bir avantajı vardır (ODP-Ozone Depletion Potential:0, GWP-Global Warming Potential: 0.001) [14]. Şekil 2.4'de R600a soğutkanının moleküler yapısı [15], Tablo 2.2'de R600a soğutkanının kimyasal ve fiziksel özellikleri [16], Şekil 2.5'te R134a soğutkanının moleküler yapısı [17], Tablo 2.3'de ise R134a soğutkanının fiziksel ve kimyasal özellikleri görülmektedir [18].



Şekil 2.4 R600a Moleküler Yapısı [15]

Tablo 2.2 R600a Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri [16]

Özellikler	Değer
Molekül Ağırlığı (kg/molkg)	58.122
Buhar Basıncı (atm @ 21.1°C)	2.09
Özgül Hacim (m ³ /kg @ 1 atm, 21.1°C)	0.405
Kaynama Noktası (°C @ 1 atm)	-11.72
Donma Noktası (°C @ 1 atm)	-159.6
Sıvı Yoğunluğu (kg/L @ 1 atm, 15.5°C)	0.563
Kritik Sıcaklık (°C)	135
Kritik Basınç (atm)	36.01
Havada Yanıcılık Limitleri (% Hacimce)	1.8-8.4
Kendi kendine tutuşma sıcaklığı (°C)	543.3
Buhar Viskozitesi (cP @ 1 atm, 23°C)	0.00755
Yüzey Gerilimi (N/m @ 1 atm, -20°C)	0.01528
Suda Çözünürlük (m ³ /m ³ @ 1 atm, 17°C)	1.7/100
Sıvı Özgül Isısı, Cp (cal/g °C @ 1 atm, 15.5°C)	0.5695
Buhar Özgül Isısı, Cp (cal/g °C @ 1 atm, 15.5°C)	0.3872
Buhar Özgül Isısı, Cv (cal/g °C @ 1 atm, 15.5°C)	0.3530



Şekil 2.5 R134a Moleküler Yapısı [17]

Tablo 2.3 R134a Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri [18]

Özellikler	Değer
Molekül Ağırlığı (kg/molkg)	102.03
Buhar Basıncı (atm @ 21.1°C)	5.83
Özgül Hacim (m ³ /kg @ 1 atm, 21.1°C)	0.23
Kaynama Noktası (°C @ 1 atm)	-26.07
Donma Noktası (°C @ 1 atm)	103.3
Sıvı Yoğunluğu (kg/L @ 4.9atm, 15.5°C)	1.24
Kritik Sıcaklık (°C)	101.06
Kritik Basınç (atm)	40.06
Buhar Viskozitesi (cP @ 1 atm, 23°C)	0.0117
Yüzey Gerilimi (N/m @ 1 atm, -26°C)	0.015
Sıvı Özgül Isısı, Cp (cal/gr.°K @ 4.9 atm, 15.5°C)	0.3319
Buhar Özgül Isısı, Cp (cal/gr.°C @ 4.9 atm, 15.5°C)	0.233

2.4. Buzdolabı Kompresör Yağı – Soğutkan İlişkisi

Kompresör yağı ve soğutkan kompresör haznesi içinde birlikte yer almakta ve sürekli temas halinde bulunmaktadır. Uygun yağ-soğutkan çifti kullanıldığında soğutkan yağ içinde belli bir oranda çözünmekte ve bir karışım oluşmaktadır. Temel olarak soğutkanın yağ içinde homojen bir şekilde çözünmesi istenmektedir. Bunun nedeni yağ ile soğutkan karışması sonucu yağın viskozitesinin azalması ve böylelikle kompresörde yağlama işleminin iyileşmesi ve kondenser ile evaporatöre kaçan yağın soğutkanla karışarak kompresöre daha kolay bir biçimde taşınmasıdır. Her ne kadar istenirse de kondenser ve evaporatöre bir miktar yağ kaçıışı olmaktadır. Yağ

azalması nedeniyle kompresörde yağlamanın etkilenmemesi ve yağ birikmesi sebebiyle kondenser ile evaporatörde ısı transferi etkinliğinin azalmaması amacıyla sisteme kaçan yağın geri dönmesi istenmektedir. Yağın kompresöre geri dönmesi için düşük sıcaklıkta akıcılığının yüksek olması ve soğutkanla karışabilmesi istenmektedir. Soğutkanın yağ içinde çözünebilmesi ve uygun bir karışımın oluşabilmesi yağ ve soğutkanın molekül yapısına bağlı olmaktadır. Tablo 2.4’de bazı soğutkan türleri için uygun yağ grupları verilmiştir [13].

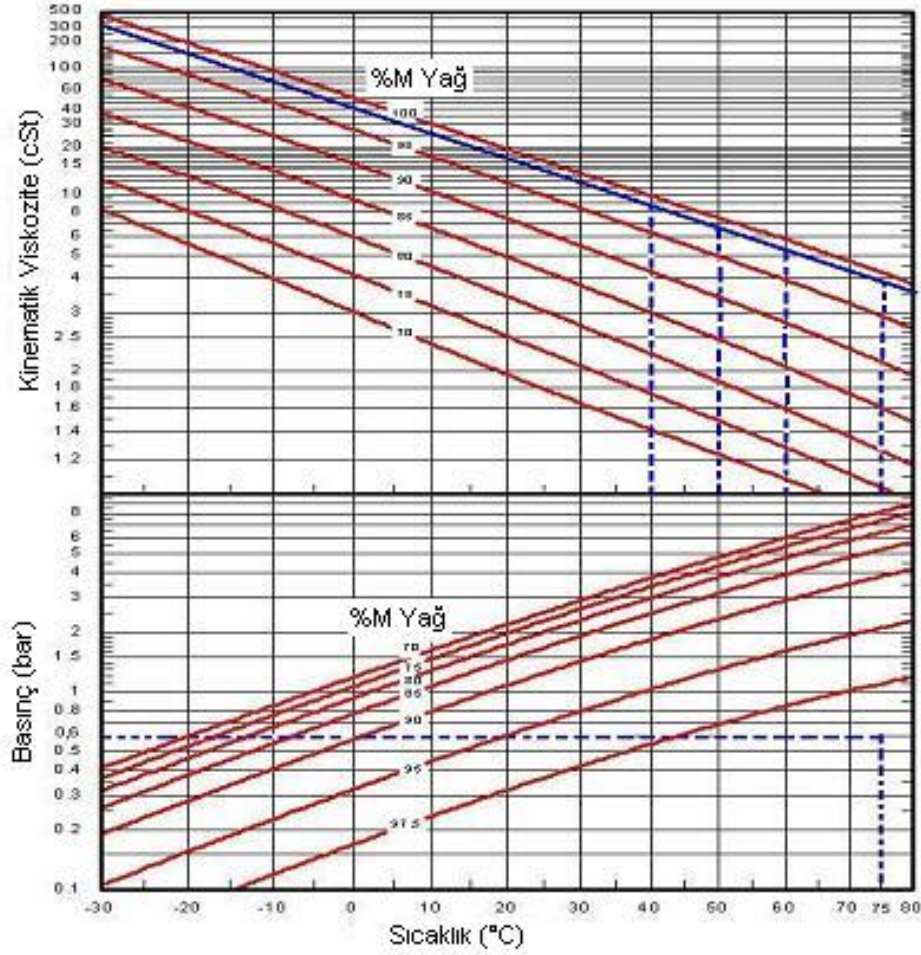
Tablo 2.4 Bazı Soğutkan Türleri İçin Uygun Yağ Grupları [13]

Soğutkanlar		Uygun Yağ Cinsleri
Kod	Formül	
R 12	CCl_2F_2	M, MA, A, POE
R 22	CHClF_2	M, MA, A, POE
R 134a	CH_2FCF_3	POE
R 600a	C_4H_{10}	M, PAO, PAG
M: Mineral Yağ ; POE: Polyol Ester ; A: Alkil Benzen ; PAO: Polialfaolefin ; MA: Mineral + Alkil Benzen ; PAG: Polialkilen Glikol		

Kompresör içinde soğutkan çözünürlüğü; sıcaklık, basınç ve soğutkan miktarına bağlı olarak değişmektedir. Soğutkanın yağ içinde çözünmesinin kompresör üzerinde en büyük etkisi yağ viskozitesini azaltmasıdır. Yağ viskozitesi kompresör tasarımında birincil öneme sahip bir özelliktir. Kompresör çalışırken hareketli parçalar üzerine gelen yükler ile yağ filmi özellikleri arasında doğrudan bir ilişki bulunmaktadır. Yatak yüzeylerinde oluşacak yükü taşıyabilecek özelliklerde bir yağ filminin oluşması için yapılacak yatak tasarımları ve yatak malzemelerinin seçiminde yağ filmi viskozitesinin bilinmesi gerekmektedir. Çözünen soğutkan nedeniyle yağ viskozitesi ve böylelikle oluşan yağ filminin yük taşıma kapasitesi değişmektedir. Yağ viskozitesi basit yöntemlerle ölçülebilirken, yağ-soğutkan karışım viskozitesinin belirlenmesi için özel deney sistemlerinin geliştirilmesi ya da karışımın termodinamik yapısını göz önüne alan matematiksel ifadeler ile hesaplanması gerekmektedir.

Kompresör ve buzdolabı üreticileri yağ-soğutkan karışımlarının sıcaklık ve basınca bağlı viskozite ve soğutkan çözünürlüğü değerlerini genellikle yağ üretici firmalar ve

bazı enstitüler tarafından hazırlanan ve “Daniel Chart” adı verilen grafiklerle incelemektedir. 10 cSt viskozite değerine sahip bir mineral yağ ve R600a soğutkanı için örnek bir grafik Şekil 2.6’da görülmektedir.



Şekil 2.6. Mineral Yağ-R600a Çifti İçin “Daniel Chart” Örneği [10]

Şekil 2.6’de görülen iki bölümden oluşan grafikte kompresör çalışma sıcaklığı ve basıncının bilinmesiyle alt kısımdaki grafikten soğutkan çözünürlüğü bulunabilmektedir. Çözünürlük değerinin bulunmasından sonra aynı sıcaklık ve çözünürlük değeri kullanılarak karışımın viskozitesi üst taraftaki grafik yardımıyla belirlenebilmektedir.

2.5. Yağ-Soğutkan Karışımlarının Termodinamik Yapısı

Yağ-soğutkan karışımlarında buhar faz, sıvı faz ve karışım durumu olmak üzere üç tür ideal olmayan davranıştan (non-idealite) söz edilmektedir. Buhar faz non-idealitesi; buhar faz fugasitesi tanımını kullanarak ideal gaz kanunundan sapmayı

ifade etmektedir. Sıvı faz Non-idealitesi; fugasite kavramı ve sıvı faz fugasitesinin basınç ile değişimini ifade eden Poynting Etkisi (Pe) adı verilen ikinci bir düzeltme bağıntısı kullanılarak açıklanmaktadır. Karışım Non-idealitesi ise, buhar ve sıvı faz non-idealitelerini bir fonksiyon olarak birleştiren “aktivite katsayısı” ile ifade edilmektedir [19].

2.5.1. Buhar Faz Non-İdealitesi

Yağ-soğutkan karışımı buhar fazı ideal olmayan gaz (gerçek gaz) davranışı göstermektedir. İdeal gaz - gerçek gaz davranışı dönüşümü ise fugasite kavramı kullanılarak açıklanmaktadır [19, 20].

Herhangi bir karışım için gerekli termodinamik özelliklerin türetilmesi için başlangıç noktası Gibbs serbest enerji bağıntısıdır [19]. Gibbs serbest enerjisi bir reaksiyonun kendiliğinden gerçekleşebilmesi olasılığını belirleyen termodinamik ifadedir [21].

Gibbs serbest enerjisi (g), aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$g = h - Ts \quad (2.1)$$

Gibbs serbest enerjisi ile sıcaklık ve basınç ilişkisi ise;

$$dg = vdP - sdT \quad (2.2)$$

ifadesi ile verilmektedir. Bu eşitlik izotermal sistemler için;

$$dg = vdP \quad (2.3)$$

ifadesine dönüşmektedir.

İdeal gazlar için Gibbs serbest enerjisindeki değişim (2.3) no’lu denklemden elde edilebilmektedir. Ancak yağ-soğutkan karışımlarının buhar fazı gibi gerçek gazlar söz konusu olduğunda fugasite kavramı daha açıklayıcı olmaktadır. Fugasite buhar basınçları için gerçek gazların ideal gaz olarak kabul edilmesini sağlayan bir düzeltme faktörüdür [19].

İdeal gaz kabulü ile (2.3) no’lu denklem aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir:

$$dg = RT \frac{dP}{P} = RTd(\ln P) \quad (2.4)$$

(2.4) no'lu eşitlikte gerçek Gibbs serbest enerji değişimindeki basınç etkisi fugasite (f) ile ifade edildiğinde Gibbs serbest enerjisi ve fugasite arasındaki ilişki verilebilmektedir:

$$dg = RTd(\ln f) \quad (2.5)$$

Fugasite kavramı genellikle fugasite katsayısı ($\bar{\Phi}_i$) ile ifade edilmektedir. Bir karışımda yer alan bir bileşen için fugasite katsayısı;

$$\bar{\Phi}_i = \frac{\bar{f}_i}{y_i P} \quad (2.6)$$

eşitliği ile verilmektedir. Yağlar için buhar basıncı çok düşük mertebelere sahip olduğundan (30° C'de, 1.6E-12 atm. [19]), toplam buhar fazın soğutkan tarafından oluşturulduğu kabul edilebilmektedir. Bu nedenle buhar fazındaki soğutkan oranı $y_i = 1$ olacaktır.

Düşük basınçlarda gerçek gazlar ideal gaz davranışına sahip olacağından fugasite katsayısı da 1'e yakınsamaktadır:

$$\lim_{P \rightarrow 0} \bar{\Phi}_i = 1 \quad (2.7)$$

(2.5) no'lu eşitlik integre edildiğinde;

$$g - g^0 = RTd(\ln \frac{\bar{f}_i}{P}) = RT(\ln \bar{\Phi}_i) \quad (2.8)$$

eşitliğine ulaşılmaktadır. g^0 ifadesi düşük basınçlardaki başlangıç Gibbs enerjisini belirtmektedir.

(2.6) ve (2.7) no'lu eşitlikler kullanılarak;

$$d(\ln \bar{\Phi}_i) = d(\ln \bar{f}_i) - d(\ln P) \quad (2.9)$$

eşitliği elde edilmektedir. (2.3) ve (2.5) no'lu eşitlik (2.7) no'lu denklem içine yerleştirildiğinde;

$$d(\ln \bar{\Phi}_i) = \frac{1}{RT} \left(v_i - \frac{RT}{P} \right) dP \rightarrow \ln \bar{\Phi}_i = \frac{1}{RT} \int_0^P \left(v_i - \frac{RT}{P} \right) dP \quad (2.10)$$

ulaşılan eşitlikle fugasite katsayısı ve basınç, sıcaklık ilişkisi ifade edilebilmektedir [19].

(2.10) no’lu denklemde yer alan ifade bir hal denklemi ile birleştirildiğinde karışımı oluşturan her hangi bir “i” bileşeni için fugasite ifadesi kolaylıkla hesaplanabilecek şekilde turetilebilmektedir.

Peng-Robinson kubik hal denklemi yağ-soğutkan karışımlarının buhar basıncını belirlemede oldukça doğru sonuçlar veren bir hal denklemidir [19]. Eşitlik aşağıda ifade edilmektedir:

$$P = \frac{RT}{v - b} - \frac{a\alpha}{v(v + b) + b(v - b)} \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} a &= 0.45724 \frac{(RT_c)^2}{P_c} \\ b &= 0.07780 \frac{RT_c}{P_c} \\ \alpha &= \left[1 + M(1 - (T/T_c)^{1/2}) \right]^2 \end{aligned} \quad (2.12)$$

Fugasite-sıcaklık-basınç ilişkisini veren (2.10) no’lu eşitlik ile Peng-Robinson hal denklemi (2.11) birleştirildiğinde;

$$\ln \bar{\Phi}_i = \frac{b_i}{b} (z_c - 1) - \ln(z_c - b) - \frac{a}{2b\sqrt{2}} \left(\frac{2\sum y_j a_{ij}}{a} - \frac{b_i}{b} \right) \ln \left(\frac{z_c + 2.414b}{z_c - 0.414b} \right) \quad (2.13)$$

ifadesi elde edilmektedir ($z_c = Pv/RT$). Denklemdaki a ve b katsayıları Peng-Robinson eşitliğinde kullanılan katsayılar ile aynıdır. Buhar fazda sadece soğutkan olduğu kabulüne dayanarak denklemdaki karışım katsayıları saf soğutkan katsayıları ile ifade edilebilmektedir. Böylelikle buhar faz Non-idealitesini ifade eden fugasite katsayısı aşağıdaki eşitliğe dönüşmektedir [19, 20]:

$$\ln \bar{\Phi}_i = z_c - 1 - \ln(z_c - b) - \frac{a}{2b\sqrt{2}} \ln\left(\frac{z_c + 2.414b}{z_c - 0.414b}\right) \quad (2.14)$$

2.5.2. Sıvı Faz Non-İdealitesi

Poynting Etkisi (Pe) kavramı kızgın-aşırı ısınmış (superheated) sıvı fazın fugasitesi için belirlenmiş bir düzeltme faktörüdür. (2.14) no'lu eşitlikle verilen fugasite eşliği sadece buhar faz ve saf doymuş sıvılar için kullanılırken, doymuş buhar faz fugasitesi doymuş sıvı faz fugasitesine eşit olmaktadır. Ancak yağ-soğutkan karışımındaki yağ nedeniyle karışım basıncı düşmekte ve bu nedenle karışım sıvı fazı saf soğutkan sıvı fazına göre kızgın olmaktadır [19].

Aşırı ısınma (superheating) ve aşırı soğuma (subcooling) etkisi (2.10) no'lu denkleme aşağıdaki gibi bir ekleme yapılarak ifade edilmektedir:

$$\ln \bar{\Phi}_i = \frac{1}{RT} \int_0^{P_s} \left(v_i - \frac{RT}{P} \right) dP + \frac{1}{RT} \int_{P_s}^P \left(v_{i,L} - \frac{RT}{P} \right) dP \quad (2.15)$$

Eşitlikteki ilk terim bir ideal gazdan ($P=0$) saf doymuş sıvıya (P_s) kadarki fugasiteyi, ikinci terim ise karışım basıncı (P) ile doymuş sıvı basıncı (P_s) arasındaki farkı vermektedir. Eşitlik integre edildiğinde;

$$\ln \bar{\Phi}_i = \ln \bar{\Phi}_{i,s} + \int_{P_s}^P \frac{v_{i,L}}{RT} dP + \ln\left(\frac{P_s}{P}\right) \quad (2.16)$$

eşitliği elde edilmektedir. Eşitliğe fugasite katsayısı ifadesi yerleştirildiğinde;

$$f_L = \bar{\Phi}_{i,s} P_s (Pe) \quad (2.17)$$

(f_L), sıvı faz fugasitesi bulunmaktadır. Böylelikle sıvı faz non-idealite düzeltme faktörü Poynting Etkisi (Pe) aşağıdaki ifadeye dönüşmektedir [19, 20]:

$$Pe = \exp\left[\frac{v_{i,s}(P - P_s)}{RT}\right] \quad (2.18)$$

2.5.3. Karışım Non-İdealitesi

İdeal bir karışım tamamen aynı boyutta moleküllere sahip ve tüm moleküller arasındaki çekim kuvvetinin eşit olduğu karışımlardır. Böyle bir sistemde buhar-sıvı dengesi söz konusu olduğunda, buhar faz ideal gaz olarak kabul edilmekte ve karışım Raoult Kanunu ile tanımlanmaktadır. Raoult kanunu karışım basıncı ile sıvı ve gaz faz komponentleri arasındaki ilişkiyi belirtmektedir:

$$P_i = y_i P = x_i P_{i,s} \quad (2.19)$$

(P_i : i bileşeni kısmi basıncı, P :toplam basınç)

Ancak yağ-soğutkan karışımlarında olduğu gibi buhar faz ideal durumdan farklılık gösteriyorsa, Raoult kanunu yerine fugasite kavramı kullanılmalıdır. Karışım fugasitesi bulunurken basınç terimlerinin yerini fugasite terimi alarak ideal gaz eşitlikleri kullanılabilir. Bu yöntem Lewis-Randall kuralı olarak adlandırılmaktadır:

$$\bar{f}_i = y_i f_i \quad (2.20)$$

Raoult kanunu ve Lewis-Randall kuralının sadece ideal karışımlara uygulanabileceği unutulmamalıdır. Yağ-soğutkan karışımları gibi birçok karışım ideal olmayan karışımlardır. Bu nedenle ideallikten sapma için “aktivite ve aktivite katsayısı” adı verilen tanımlamalar kullanılmaktadır [19,20].

Aktivite ve Aktivite Katsayısı:

Aktivite; bir karışımdaki herhangi bir bileşenin fugasitesi ile o bileşenin standart durumdaki fugasitesi arasındaki orandır (2.21 eşitliği). Standart durum sabit bileşim ve sabit basınçta belirlenmektedir. Standart durum için genellikle saf bileşenin sıfır basınçtaki fugasitesi kullanılmaktadır. Ancak soğutkanlar için böyle bir değerin belirlenmesindeki zorluklar nedeniyle standart durum olarak doygunluk basıncındaki fugasite değerlerinin kullanılması daha doğru olacaktır.

$$a_i = \frac{\bar{f}_i}{f_i^0} = \frac{f_i(T, P, x)}{f_i(T, P^0, x^0)} \quad (2.21)$$

Aktivite tanımı ile bir karışımın ideallikten sapması için kullanılan en yaygın ifade olan “aktivite katsayı” hesaplanabilmektedir. Aktivite katsayısı (γ) aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\gamma_i = \frac{a_i}{x_i} \quad (2.22)$$

Raoult kanunu ideal gaz ve ideal karışımlar için kullanılırken, Lewis-Randall kuralı gerçek gaz ve ideal karışımlar için kullanılmaktadır. Ancak çoğu karışım gerçek gazlardan oluşan ideal olmayan karışımlardır. Bu nedenle aktivite katsayısı Lewis-Randall kanunu ile birlikte bir düzeltme faktörü olarak kullanılmaktadır. Aktivite katsayısı basınç ve fugasite katsayıları ile birlikte aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\gamma_i = \frac{y_i P \bar{\Phi}_i}{x_i P_{i,s} \bar{\Phi}_{i,s} P_e} \quad (2.23)$$

Aktivite katsayısının 1’den büyük olması Raoult kanunundan pozitif yöndeki sapmaları ifade ederken; bileşenlerin kısmi basıncı, doygunluk basıncı ve mol fraksiyonları çarpımından büyük olmaktadır. Bu tür karışımlarda aynı tür moleküller arası çekim kuvveti farklı moleküller arası çekim kuvvetinden büyük olmaktadır. Aktivite katsayısının 1’den düşük olması durumunda ise farklı moleküller arası çekim kuvvetinin daha yüksek olması ve büyük ihtimalle hidrojen bağları nedeniyle güçlü moleküller arası çekim kuvveti oluşmaktadır [19,20].

2.6. Karışım Modellenmesi

Bu bölümde sıvı-gaz karışımı modellenmesi hakkında temel bilgiler yağ-soğutkan karışımlarının yapısı öne çıkarılarak verilmiştir. Bir karışım modeli oluşturulduğunda genellikle bileşenlerin saf haldeki ve birbirleri ile etkileşim halindeki özelliklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Etkileşim özellikleri ise genellikle deneysel veriler kullanılarak elde edilen katsayılar ile belirlenmektedir.

Bir karışımın modellenmesinde iki farklı yöntem izlenmektedir. Bunlardan ilki modellemeye sadece hal denklemi kullanılan yöntemdir. Bu yöntemde hal denklemi parametreleri her bir karışım bileşeni (yağ, soğutkan) için ayrı ayrı belirlenmeli ve karışım parametrelerini oluşturmak üzere birleştirilmelidir. Bu sebeple hal denklemi

ile karışım modellenmesinde yağ özelliklerinin çok iyi belirlenmesi gerekmektedir. Ancak çalışma sıcaklıklarında yağ buhar basıncı çok düşük olduğundan bu bilgilerin (buhar fazı-özgül hacmi gibi) doğru bir şekilde belirlenmesi oldukça zordur. Bu nedenle yağ-soğutkan karışımlarının modellenmesinde hal denklemi yöntemi tercih edilmemektedir [19].

Karışım modellenmesinde ikinci yaklaşım ise karışımın aktivite katsayısı ile sıcaklık, basınç ve çözünürlük ilişkisinin kurulmasıdır. Bu ilişki Gibbs aşırılık enerjisi (Excess Gibbs Energy) kavramı ve aktivite katsayıları ile tanımlanmaktadır. Bir termodinamik aşırılık özelliği; bir çözeltideki gerçek termodinamik özellik değeri ile aynı şartlarda o çözeltinin ideal olması durumunda sahip olacağı özellik değeri arasındaki farktır. Gibbs aşırılık enerjisi sıcaklık, karışım bileşimi ve etkileşim parametrelerine bağlı olarak aşağıdaki gibi yazılabilmektedir:

$$\frac{g^E}{RT} = f(T, x_1, \dots, x_n, \gamma_1, \dots, \gamma_n) \quad (2.24)$$

Gibbs-Duhem ilişkisi kullanıldığında aktivite katsayısı sıcaklık, bileşim ve etkileşim parametreleri cinsinden yazılabilmektedir:

$$\ln \gamma_i = \left[\frac{\partial (g^E / RT)}{\partial n_i} \right]_{T, P, n} \quad (2.25)$$

Eşitliklerden de anlaşılacağı gibi oluşturulacak modelin doğruluğu Gibbs enerjisi ile sıcaklık, bileşim ve etkileşim parametreleri arasındaki ilişkiye bağlıdır.

Gibbs aşırılık enerjisi kavramına bağlı olarak sıvı çözeltilerde moleküler termodinamik ilişkileri lokal bileşim (Local Composition) teorisine dayanmaktadır. Bu teoriye göre sıvı bir çözelti içinde lokal bileşimler tüm karışım bileşiminden farklı olarak, farklı moleküller arası çekim kuvveti ve farklı molekül boyutuna sahip yapıda bulunmaktadır. Teori ilk olarak 1964 yılında G. M. Wilson tarafından ortaya konmuş ve literatürde Wilson eşitliği olarak bilinmektedir. Wilson eşitliğinin başarısından sonra yapılan modifikasyonlarla birçok yeni model geliştirilmiştir. Bu modeller aşağıda sunulmaktadır:

- Tsuboka & Katayama Eşitliği
- Wang & Chao Eşitliği

- Heil Denklemi
- NRTL (Non-Random Two-Liquid Theory)
- UNIQUAC (Universal Quasi-Chemical Theory) [19, 20].

Yağ-soğutkan karışımları bileşimlerinin modellenmesinde lokal bileşim modellerinden (Local Composition Models) farklı olarak bazı ampirik eşitlikler de kullanılmaktadır. Lokal bileşim modelleri dışında en yaygın olan eşitliklerin başında Flory-Huggins Polimer Teorisi gelmektedir [22-24]. Ancak Flory-Huggins teorisi polimer çözeltileri dikkate alınarak türetildiğinden, çoğu yağ-soğutkan karışımının modellenmesinde etkili olamamaktadır [19]. Aşağıda yağ-soğutkan karışımların bileşiminin belirlenmesi amacıyla kullanılabilen Wilson Eşitliği ve viskozite belirlenmesi amacıyla kullanılabilen bir eşitlik hakkında ayrıntılı bilgi verilmektedir.

2.6.1. Wilson Eşitliği

Wilson eşitliği yağ-soğutkan karışımı bileşimlerinin belirlenmesi amacıyla kullanılabilmektedir. Wilson eşitliği karışımlar için Gibbs serbest enerji denkleminde yeni bir ifade tanımlamıştır. Wilson kendi eşitliğini “yarı teorik” olarak tanımlamaktadır. Lokal bileşimlerin ifade edilmesinde Boltzmann dağılımına benzer bir ifade kullanılmıştır:

$$\frac{x_{12}}{x_{11}} = \frac{x_2}{x_1} \frac{e^{-\lambda_{12}/RT}}{e^{-\lambda_{11}/RT}} \quad (2.26)$$

$$\frac{x_{21}}{x_{22}} = \frac{x_1}{x_2} \frac{e^{-\lambda_{21}/RT}}{e^{-\lambda_{22}/RT}} \quad (2.27)$$

x_{12} : “Komponent-2” etrafındaki “komponent-1 lokal mol fraksiyonu”,

x_{11} : “Komponent-1” etrafındaki “komponent-1 lokal mol fraksiyonu”.

$$\begin{aligned} x_{21} + x_{11} &= 1 \\ x_{12} + x_{22} &= 1 \end{aligned} \quad (2.28)$$

λ_{12} : “Komponent-2” üzerindeki “molekül-1 etkileşim enerji parametresi”,
($\lambda_{12} = \lambda_{21}$)

Lokal mol fraksiyonları ile birlikte molar Gibbs aşırılık enerjisi şu şekilde yazılabilmektedir:

$$\frac{g^E}{RT} = -x_1 \ln(x_1 + x_2 A_{12}) - x_2 \ln(x_2 + x_1 A_{21}) \quad (2.29)$$

$$A_{12} = \frac{v_2}{v_1} \exp\left(\frac{-a_{12}}{RT}\right) \quad (2.30a)$$

$$A_{21} = \frac{v_1}{v_2} \exp\left(\frac{-a_{21}}{RT}\right)$$

$$a_{12} = \lambda_{12} - \lambda_{22}$$

$$a_{21} = \lambda_{21} - \lambda_{11} \quad (2.30b)$$

(2.25) ve (2.29) no'lu eşitlikler birleştirildiğinde Wilson eşitliği son halini almaktadır [19]:

$$\ln \gamma_1 = -\ln(x_1 + x_2 A_{12}) + x_2 \left[\frac{A_{12}}{x_1 + x_2 A_{12}} - \frac{A_{21}}{x_2 + x_1 A_{21}} \right] \quad (2.31)$$

2.6.2. Karışım Viskozitesinin Modellenmesi

Literatürde saf bileşenler için viskozite-sıcaklık ilişkisi genellikle aşağıda verilen eşitlik ile belirlenmektedir [4].

$$\ln(\mu) = A + \frac{B}{T} + CT + DT^2 \quad (2.32)$$

Eşitlikteki ilk iki terim yağlar için yeterli sonucu verirken soğutkanlar için çalışılan sıcaklık aralığına bağlı olarak üçüncü ve dördüncü terimler kullanılabilmektedir. Ancak bu eşitlik yukarıda da bahsedildiği gibi sadece saf bileşenler için kullanılabilmektedir. Yağ-soğutkan karışımları için kullanılabilen bir eşitlik, aşağıda verilmektedir:

$$\ln \mu_{mix} = \frac{M_1^k x_1}{M_1^k x_1 + M_2^k x_2} \ln \mu_1 + \frac{M_2^k x_2}{M_1^k x_1 + M_2^k x_2} \ln \mu_2 \quad (2.33)$$

(2.33) no'lu eşitlikte yer alan “ k ”, deneysel olarak belirlenen bir parametredir. “ $k=1$ ” olduğunda, viskozite teriminin önünde yer alan ifadeler, kütle fraksiyonuna dönüşmektedir. Literatürde yer alan çalışmalarda, k genellikle 0.6-1 arasında değişmektedir. M ise bileşenlerin molar ağırlığıdır (gr/mol) [25].

2.7. Kaynak Tarama Çalışması

Literatürde yağ-soğutkan karışımlarının bileşim ve viskozite gibi özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılmış çeşitli deneysel ve modelleme çalışmaları bulunmaktadır. Bu çalışmalar özellikle CFC ve HFC türü soğutkanlar ve bu soğutkanlara uyumlu çeşitli kompresör yağları kullanılarak yapılmıştır. Aşağıda bu çalışmalar arasından seçilen örnekler sunulmaktadır.

Soğutkan-yağ karışımları üzerine, literatürde yer alan ilk çalışma 1955 yılında Bambach tarafından yapılmıştır. Bambach bu çalışmada, R12 soğutkanı ve parafinik mineral yağ için kullanılabilecek bir korelasyon geliştirmiştir. Korelasyon (2.32a) ve (2.32b) eşitliklerinde verilmektedir [19,26].

$$\log P = 6.9972 - \frac{0.558w_0^{-0.55} - 1177.67 - 98.753w_0^{-0.55}}{T} = A \quad (T < 0^\circ C) \quad (2.32a)$$

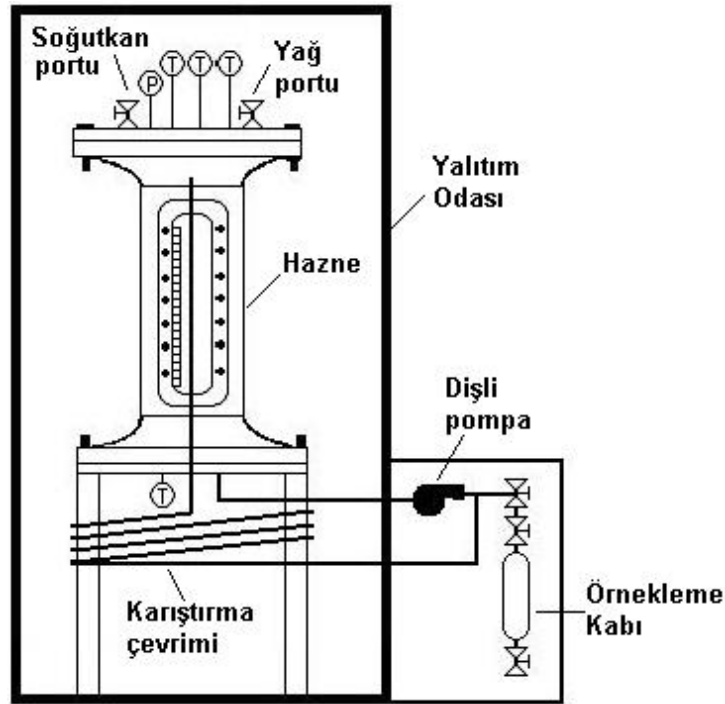
$$\log P = A - (T - 273.16) [0.002338(w_0 - 0.6)^2 - 0.000075] \quad (T < 0^\circ C) \quad (2.32b)$$

Bu çalışmanın ardından 1963 yılında Spauschus yağ-soğutkan karışımlarının modellenmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Spauschus bu çalışmada kendi deneysel verileri ile Bambach'ın verilerinden faydalanmıştır. R12 ve mineral yağ karışımının; aşırılık serbest enerji, karışma enerjisi ve karışma entropisinin hesaplandığı bu çalışmada Spauschus yağ-soğutkan karışımlarının yağ ve soğutkan molekülleri arasındaki büyüklük farkına değil mol fraksiyonlarına dayandığını belirtmiştir. Bu nedenle Flory-Huggins teorisinin büyüklük farkını en önemli faktör olarak kabul etmesi nedeniyle polimer çözeltisi teorilerinin yağ-soğutkan karışımları için yeterli hassasiyeti sağlayamayacağı belirtilmiştir [19].

Daha sonraki yıllarda Thomas ve Pham ile Grebner ve Crawford tarafından Flory-Huggins teorisine dayanarak yapılan çalışmalarda da Spauschus'un polimer

teorilerinin yağ-soğutkan karışımlarına tamamen uyarlanamayacağı görüşünde hemfikir olunmuştur [19, 22].

Grebner ve Crawford tarafından yapılan çalışmada yağ-soğutkan karışımlarının modellenmesinde kullanılacak basınç, sıcaklık, çözünürlük verilerinin elde edilmesi amacıyla bir deney sistemi kurulmuştur. Grebner tarafından tasarlanan bu deney sistemi Pate ve çalışma arkadaşlarının kullandığı sistem örnek alınarak oluşturulmuştur. Deney sistemi; karışım haznesi, karışım çevrimi, pompa, seviye gözetleme camı, örnekleme kabı ve basınç, sıcaklık sensörlerinden oluşmaktadır. Hazneye şarj edilen yağ ve soğutkan pompa yardımıyla boru hattında dolaştırılarak tekrar hazneye verilmekte ve bu sayede karıştırılmaktadır. Hazne içindeki karışımın sıcaklığı ve basıncı sensörler yardımıyla ölçülerek karışım sıcaklığı ve buhar basıncı hakkında bilgi edinilebilmektedir. Yağdaki soğutkan çözünürlüğü seviye gözetleme camı ile seviyedeki değişimden ve örnekleme kabına alınan karışım örneği bileşimi belirlenerek hesaplanabilmektedir. Deney sistemi Şekil 2.7’de görülmektedir [22].



Şekil 2.7 Grebner Deney Sistemi [22]

Çalışmada; R12-Naftenik mineral yağ, R12-Parafinik mineral yağ, R134a-Ester yağ ve R134a-PAG soğutkan-yağ çiftlerine ait sıcaklık-basınç-çözünürlük ilişkisi deneysel ve teorik yöntemlerle incelenmiştir. Çözünürlüğün teorik olarak

incelenmesinde; Raoult Kanunu, Flory-Huggins Polimer Teorisi ve ampirik korelasyonlar kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda çözünürlük ilişkisinin belirlenmesinde Raoult kanunu ve Flory-Huggins Polimer Teorisi'nin ampirik korelasyonlara göre daha kötü bir yaklaşım sunduğu vurgulanmıştır. Kullanılan ampirik korelasyon aşağıda verilmektedir [22].

$$T^* = (1 - w)(A + BP) \quad (2.33a)$$

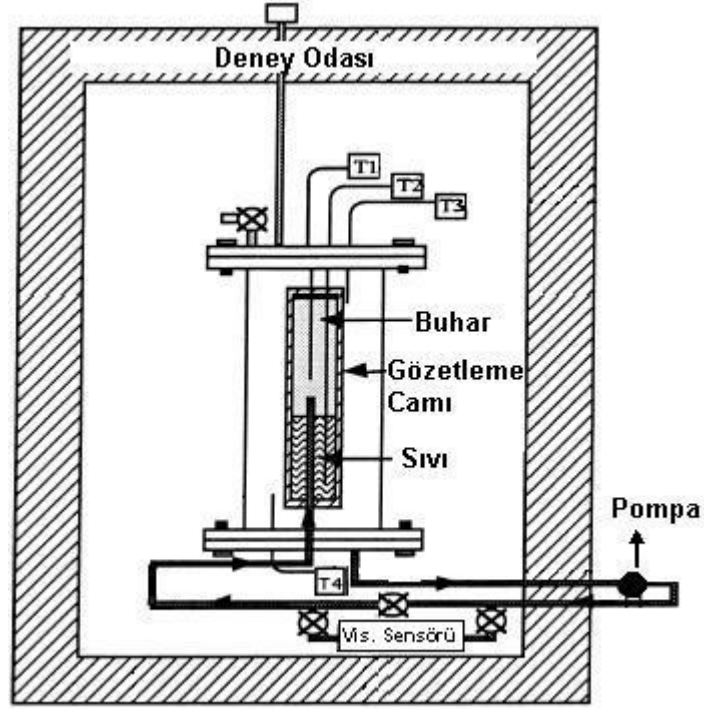
$$T^* = \frac{T - T_{SAT}(P)}{T_{SAT}(P)} \quad (2.33b)$$

$$A = x_1 + \frac{x_2}{w^{1/2}} \quad (2.33c)$$

$$B = x_3 + \frac{x_4}{w^{1/2}} + \frac{x_5}{w^5} + \frac{x_6}{w^{3/2}} + \frac{x_7}{w^2} \quad (2.33d)$$

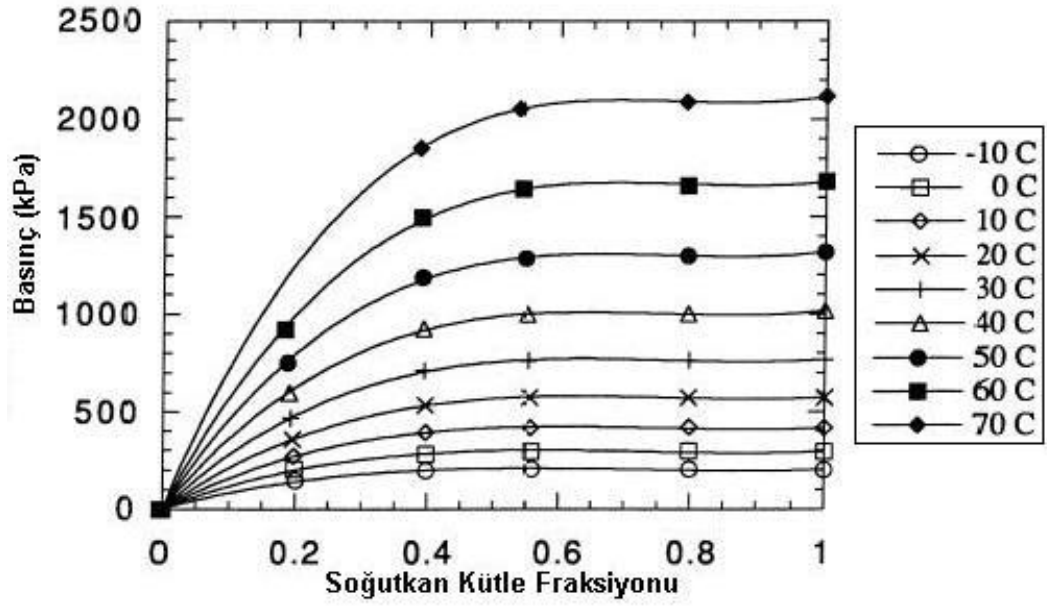
Eşitliklerde $T_{SAT}(P)$; karışım buhar basıncındaki soğutkan duygunluk sıcaklığı, w ; sıvı soğutkanın kütle fraksiyonu, x ise ampirik katsayıları belirtmektedir. Geliştirilen bu ampirik korelasyon R12-Naftenik mineral yağ karışımında R12 konsantrasyonunu belirlemede ortalama %10 hassasiyet göstermiştir [22].

Martz ve Jacobi tarafından yapılan çalışmada ise POE yağ ile R22, R125, R134a ve AZ20 (%50 R125-%50 R32) soğutkanları kullanılarak her bir POE-soğutkan çifti için çözünürlük, yoğunluk ve viskozite ile sıcaklık-basınç ilişkisi araştırılmıştır. Martz ve Jacobi tarafından kullanılan deney düzeneği Grebner ve Crawford [22] ile Van Galen ve arkadaşları [27] tarafından kullanılan deney düzeneği esas alınarak oluşturulmuştur. Deney düzeneği Grebner ve Crawford'un Şekil 2.7'deki sisteminden farklı olarak yağ-soğutkan karışımının viskozitesini ölçebilecek bir sensör içermektedir (Şekil 2.8) [19].

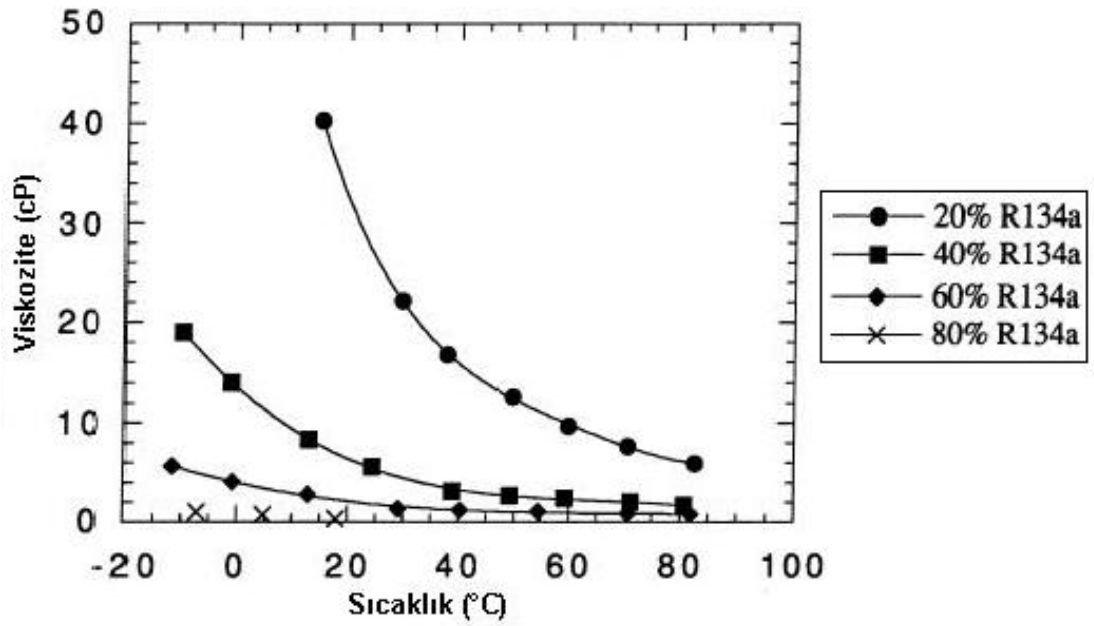


Şekil 2.8 Martz ve Jacobi Deney Sistemi [19]

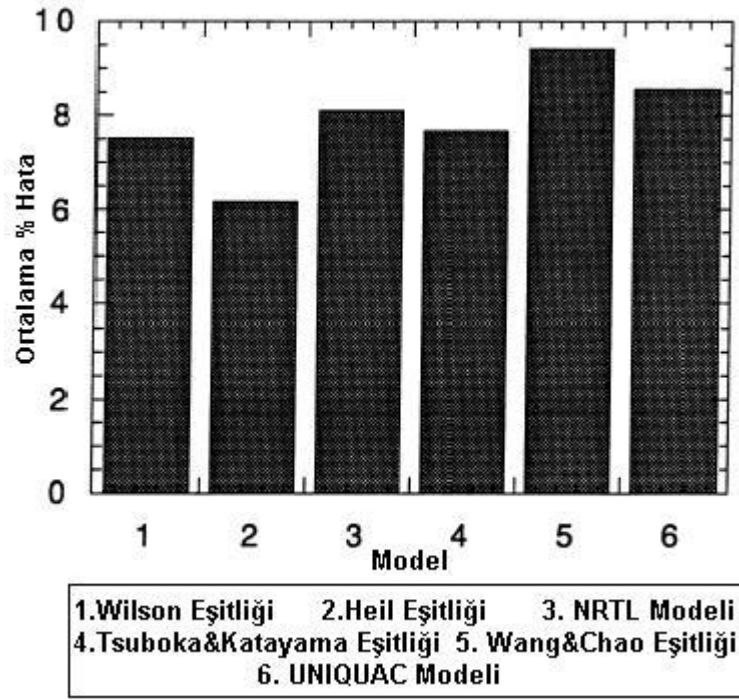
Deney düzeneğinin çalışma prensibi Grebner deney düzeneği çalışma prensibi ile aynıdır. Karışım sıcaklığı, basıncı ve soğutkan çözünürlüğü ölçümüne ek olarak karışımın viskozitesi de ölçülebilmektedir [19, 22]. Deney sistemi ile elde edilen ölçüm sonuçlarına örnek olarak POE-R134a soğutkan çifti için buhar basıncı-çözünürlük-sıcaklık ve çözünürlük-viskozite-sıcaklık ilişkisi sırasıyla Şekil 2.9 ve Şekil 2.10'da verilmektedir. Martz ve Jacobi deneysel olarak elde ettikleri çözünürlük sonuçları ile 6 farklı model kullanılarak elde edilen teorik çalışma sonuçlarını kıyaslamışlardır. Kullanılan modele bağlı olarak bu kıyaslama sonuçları Şekil 2.11'de verilmektedir. Kullanılan modeller arasında en iyi performansı Heil Eşitliği gösterirken, diğer model performanslarının da tatmin edici olduğu görülmektedir [19].



Şekil 2.9 Martz ve Jacobi Deney Sonuçları-1 [19]



Şekil 2.10 Martz ve Jacobi Deney Sonuçları-2 [19]



Şekil 2.11 Martz ve Jacobi Tarafından Kullanılan Model Performansları [19]

Yokozeki tarafından yapılan çalışmada ise soğutkan çözünürlüğü ile birlikte karışımın viskozitesinin de teorik olarak hesaplanması konusunda bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada karışım viskozitesinin modellenmesi amacıyla kullanılan eşitlik aşağıda verilmektedir.

$$\ln \mu_{mix} = \frac{M_1^k x_1}{M_1^k x_1 + M_2^k x_2} \ln \mu_1 + \frac{M_2^k x_2}{M_1^k x_1 + M_2^k x_2} \ln \mu_2 \quad (2.34)$$

(2.34) no'lu eşitlikte yer alan “ k ”, deneysel olarak belirlenen bir parametredir. “ $k=1$ ” olduğunda viskozite teriminin önünde yer alan ifadeler kütle fraksiyonuna dönüşmektedir. k katsayısı istendiğinde sıcaklık fonksiyonu olarak da tanımlanabilmektedir. M ise bileşenlerin mol ağırlığıdır (g/molg) [25].

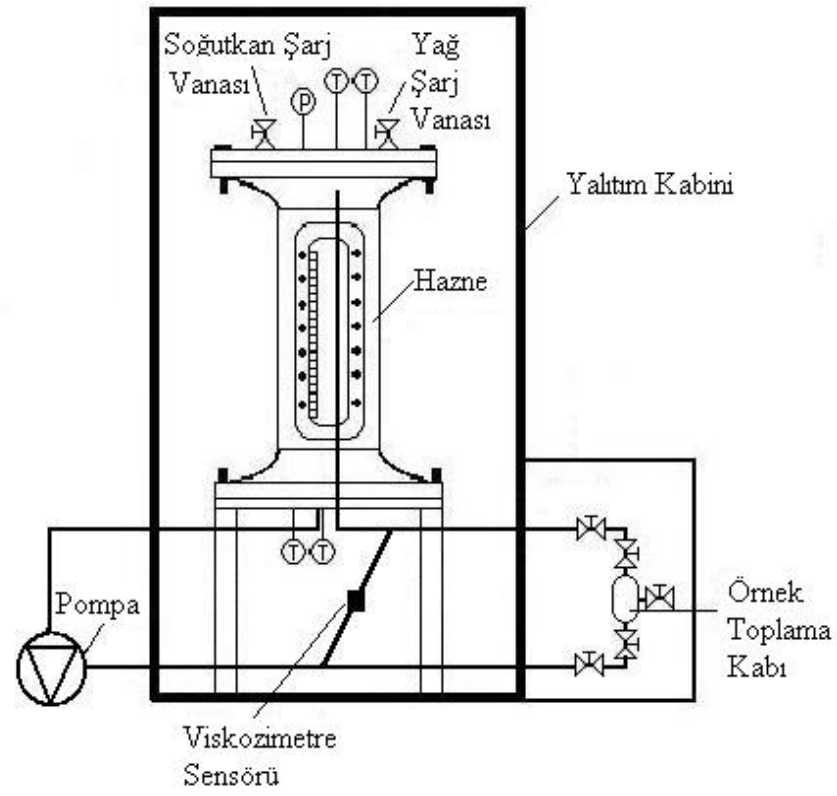
3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde kompresör tasarımında önemli parametreler olan yağ içinde soğutkan çözünürlüğü ve yağ-soğutkan karışım viskozitesi bilgilerinin buzdolabı kompresörleri çalışma şartlarında deneysel olarak elde edilmesi amacıyla yapılan çalışmalar sunulmaktadır. Çalışma:

- Deney sisteminin hazırlanması
- Deneysel çalışma yöntemi
- Deney sisteminin ve yönteminin kontrolü
- Deney sonuçları ve değerlendirilmesi ana başlıkları altında gerçekleştirilmiştir.

3.1. Deney Sisteminin Hazırlanması

Yağ içinde soğutkan çözünürlüğü ve yağ-soğutkan karışımlarının viskozite bilgilerinin elde edilebilmesi amacıyla deney sisteminin tasarımı, imalatı, montajı ve işletmeye alınması gerçekleştirilmiştir. Deney sistemi tasarımında Grebner [22] ile Jacobi [19] ve arkadaşlarının deney sistemleri de dikkate alınmıştır. Deney sisteminin şematik gösterimi Şekil 3.1’de, ayrıntılı fotoğrafı ise Şekil 3.2’de verilmektedir. Deney sistemini oluşturan bileşenlerin ve malzemelerin birçoğu yurtdışından temin edilmiştir. Bu parçaların temin süresinin uzunluğu bileşenlerin montajı ve özel olarak yaptırılan parçaların imalatı için gereken titiz ve ayrıntılı iş gücü nedeniyle deney sisteminin işletmeye alınması 1 yıl sürmüştür. Deney sistemini oluşturan bileşenler olan yağ-soğutkan karışım haznesi, pompa ve sirkülasyon hattı, viskozimetre, yalıtım kabini, sıcaklık kontrolü ve deney numunelerinin özellikleri ile ilgili ayrıntılı bilgi aşağıda sunulmaktadır.



Şekil 3.1 Deney Sisteminin Şematik Gösterimi



Şekil 3.2 Deney Sisteminin Fotoğrafi

3.1.1. Yağ-Soğutkan Karışım Haznesi

Yağ-soğutkan karışım haznesi 360 mm uzunluğunda ve 114.2x6 mm çapında paslanmaz çelik bir borunun (Cr/Ni 304) iki ucuna iç çapı aynı ölçülerde dış çapı ise 250 mm olan iki adet flanşın (Cr/Ni 304) kaynatılması ile oluşturulmuştur. Kaynatılan flanşların üzerine kapalı bir hacim oluşturmak amacıyla aynı ölçülerde kör flanşlar monte edilmiştir. Kör flanşların montajında istendiğinde sökülerek hazne içine ulaşılması amacıyla vida kullanılmıştır. Borunun iki tarafına gözetleme amacıyla yarıklar açılarak gözetleme camı ve camın hazneye tutturulması amacıyla flanşlar yerleştirilmiştir. Gözetleme camı malzemesi yaklaşık 35 bar basınç ve 150°C sıcaklığa dayanıklı borosilikat bileşimidir. Alt ve üst flanşlar ile gözetleme camı üzerindeki flanşlarda sızdırmazlık 5 mm çapa sahip o-ring malzemesi ile sağlanmaktadır. Yağ-soğutkan karışım haznesinin deney sistemine montajı yapılmadan önce çıplak haldeki flanşlar Şekil 3.3'te verilmektedir. Üst flanş üzerine açılan deliklerden hazne içine 2 adet RTD (Resistance Temperature Detector) sıcaklık sensörü, 1 adet 0-35 bar ölçüm aralığına sahip dijital basınç sensörü, 1 adet emniyet vanası, yağ ve soğutkan şarjı için vana bağlantısı yapılmıştır. Alt flanş üzerine ise 2 adet RTD sensör bağlantısı ve tahliye vanası bağlantısı yapılmıştır. Şekil 3.4'te üst flanş ve bağlantılar görülmektedir.



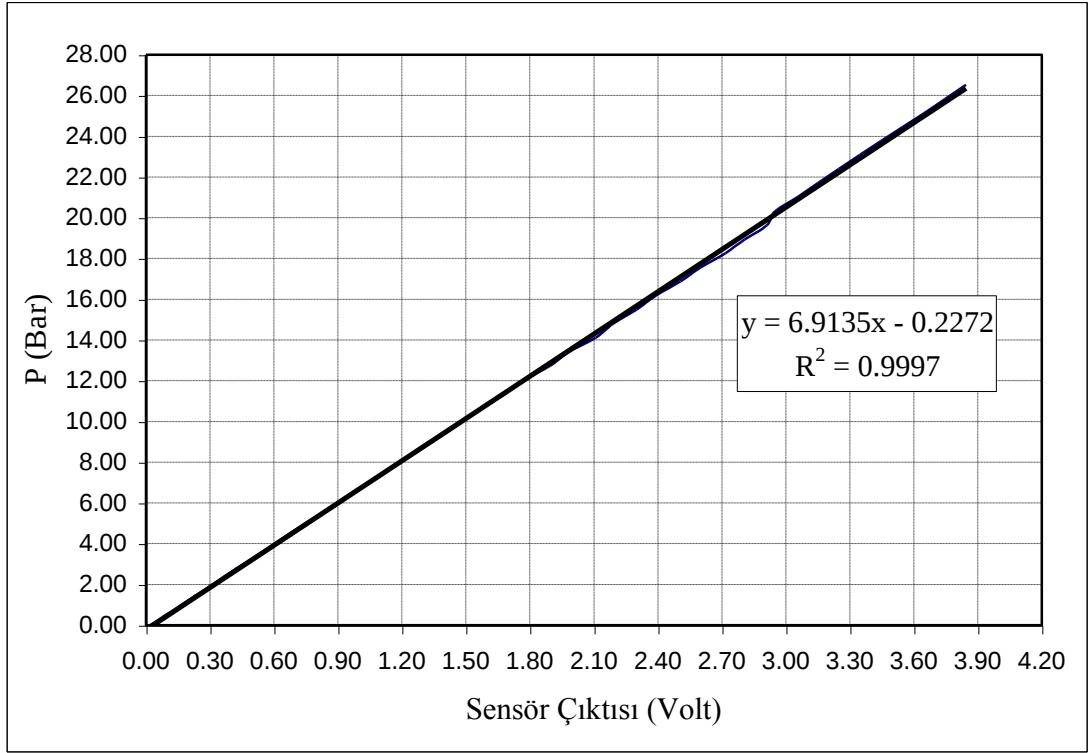
Şekil 3.3 Karışım Haznesi Flanşları



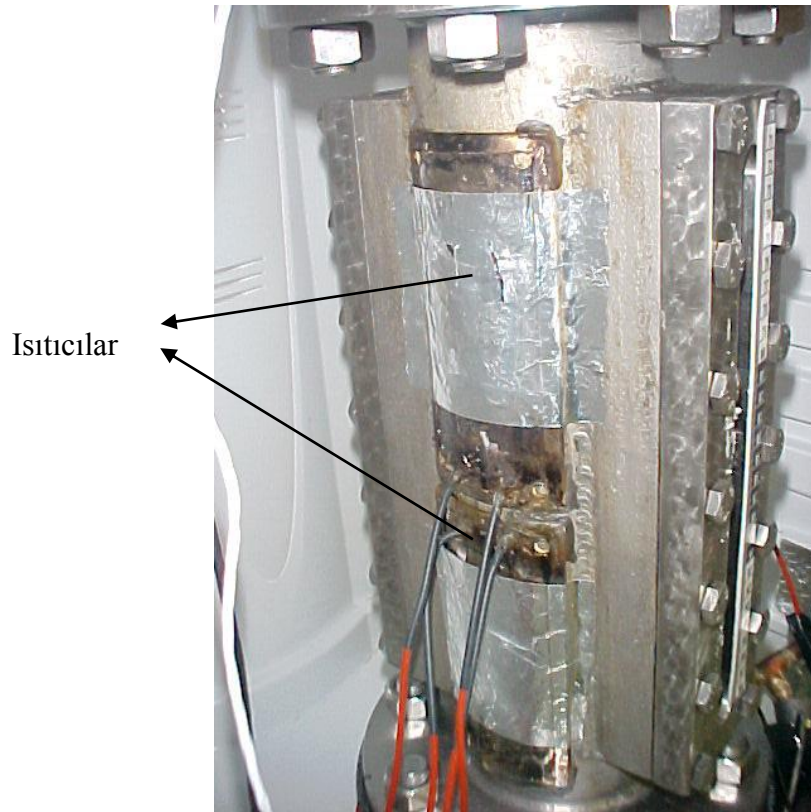
Şekil 3.4 Karışım Haznesi Üst Flanşı

Üst flanş üzerinden karışım haznesine yerleştirilen basınç sensörü çıktısı Volt değeri cinsinde elektriksel olarak okunmaktadır. Bu nedenle hassas kalibrasyon manometreleri kullanılarak sensör çıktısı basınç değeri (bar) olarak kalibre edilmiştir. Şekil 3.5’te basınç sensörü elektriksel çıktısı ile (Volt) basınç değeri (bar) arasındaki ilişki görülmektedir. Elde edilen eğriden bir doğru geçirilerek basınç değeri (bar) bu doğru fonksiyonu kullanılarak hesaplanmaktadır.

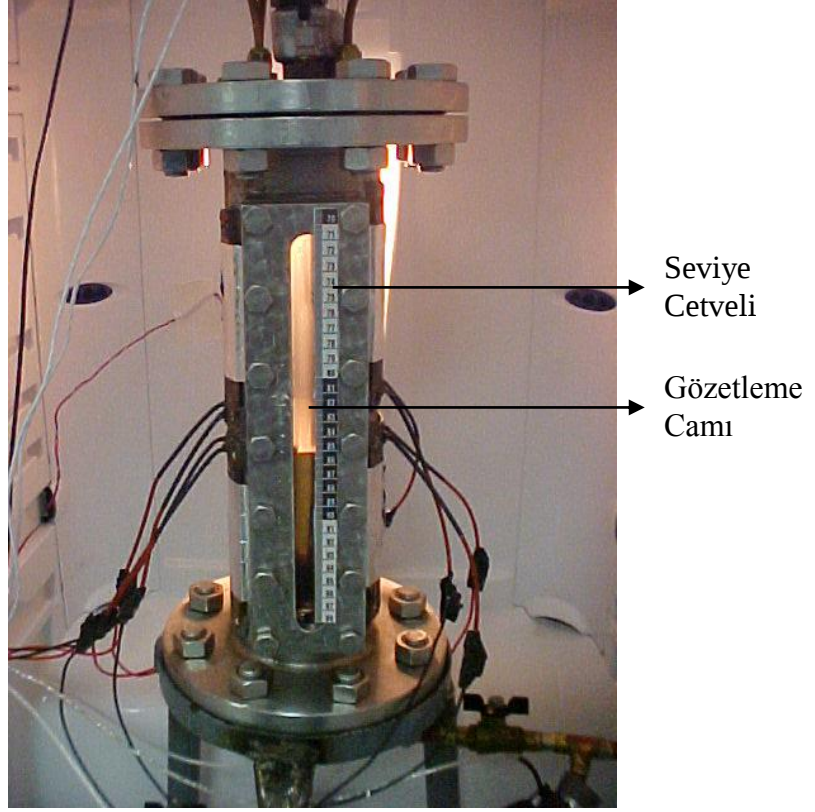
Karışım haznesinin iki yanına deney sistemi için özel olarak yaptırılan her biri 375 Watt güce sahip 4 adet ısıtıcı yerleştirilmiştir (Şekil 3.6). Ayrıca hazne üzerindeki gözetleme camının yanına milimetrik şerit yapıştırılarak hacme göre kalibre edilmiştir. Böylelikle karışım hacmi seviye cetvelinden takip edilerek belirlenebilmektedir (Şekil 3.7). Milimetrik seviye cetveli ile hazne hacmi arasındaki ilişki Şekil 3.8’de verilmektedir. Elde edilen seviye-hacim ilişkisi eğrisinden bir doğru geçirilerek hazne hacmi bu doğru fonksiyonu kullanılarak hesaplanmaktadır.



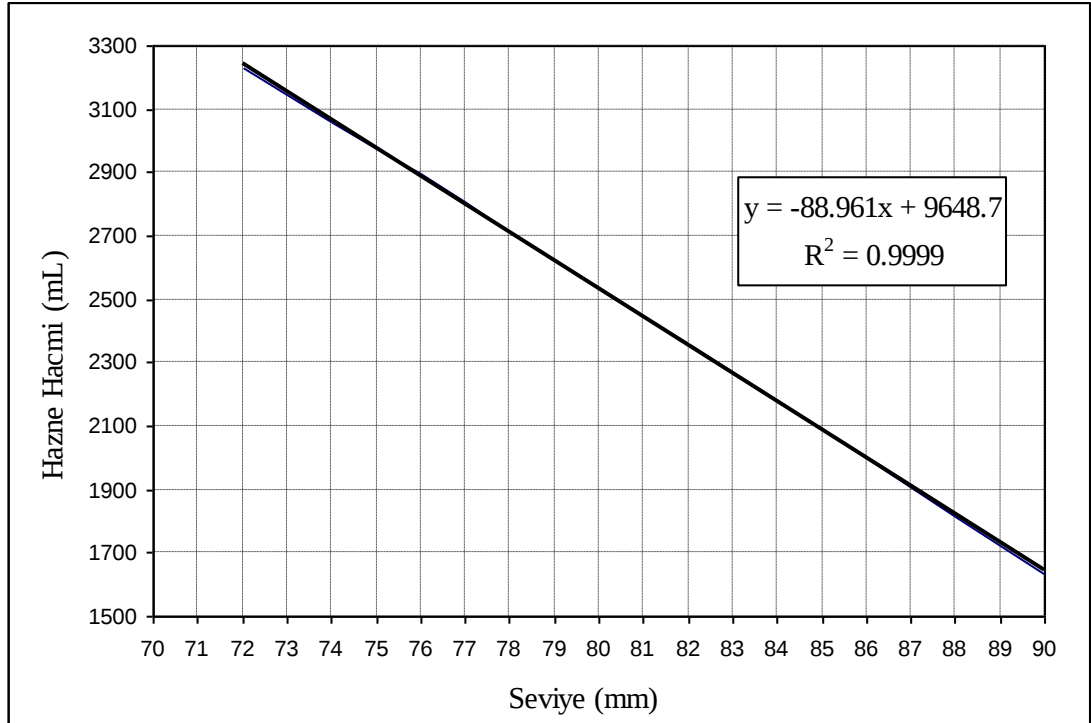
Şekil 3.5 Basınç Sensörü Kalibrasyon Eğrisi



Şekil 3.6 Karışım Haznesi Üzerindeki Isıtıcılar



Şekil 3.7 Yağ-Soğutkan Karışım Haznesi

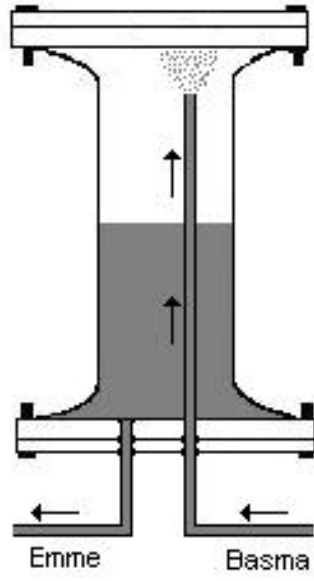


Şekil 3.8 Seviye Cetveli Kalibrasyon Eğrisi

3.1.2. Pompa ve Sirkülasyon Hattı

Karışım haznesi içine beslenen yağ ve soğutkanın birbirleriyle etkin bir şekilde karışabilmesi için bir sirkülasyon hattı yapılmıştır. Pompa yardımıyla hazne içinden emilen karışım yaklaşık 3.5 metre uzunluğundaki boru hattında dolaştırılarak tekrar hazneye basılmaktadır. Sirkülasyon hattını oluşturan boru bakır malzemeden yapılmış ve çapı 12x1.5 mm.'dir. Sirkülasyon hattı emme ucu haznenin alt flanş tarafında bulunmakta, basma ucu ise alt flanştan haznenin içine girerek üst flanşın yaklaşık 10 cm. altına kadar yaklaşmaktadır. Bu sayede yağ-soğutkan karışımı üst flanşa doğru püskürtülerek etkin bir karıştırma sağlanmıştır. Şekil 3.9'da sirkülasyon hattının hazneye bağlantısı şematik olarak görülmektedir. Yağ-soğutkan karışımının sistemde sirküle edilmesi bir dişli pompa yardımı ile yapılmaktadır. Pompa 1450 devir/dakika'da 2.5 L/dak. kapasiteye sahiptir. Pompa R600a (izobütan) gibi yanıcı ve patlayıcı gazlarla çalışmaya uygun özelliklerde imal edilmiştir [28]. Şekil 3.10'da deney sisteminde kullanılan pompa görülmektedir.

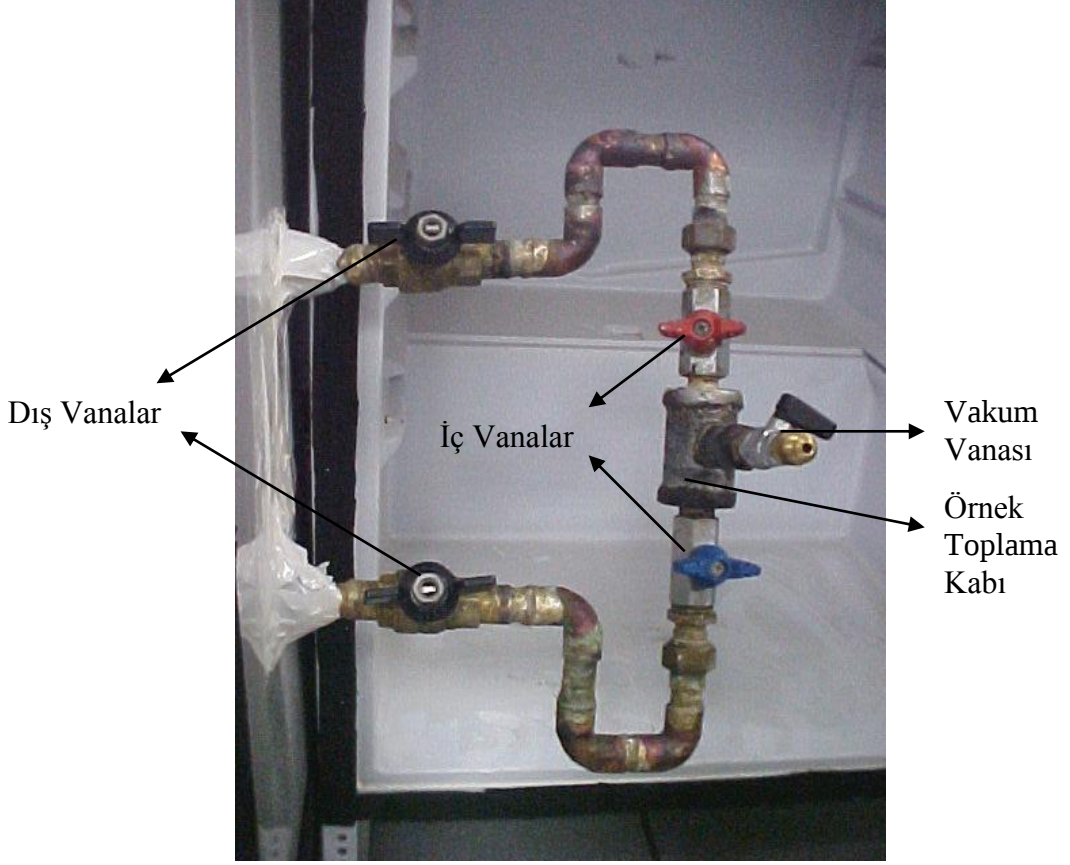
Hazne içinde sıcaklık ve basınç dengesine ulaşan yağ-soğutkan karışımından bir örnek toplama kabı yardımıyla hazne içindeki denge şartları etkilenmeden numune alınabilmektedir. Örnek toplama kabının hacmi yaklaşık 50 mL'dir (Şekil 3.11). Deney sırasında Şekil 3.11'de görülen iç vanalar kapalı tutularak örnekleme kabı sirkülasyon dışında tutulmaktadır. Numune alınması istendiğinde ise karışım örneği bu vanalar açılarak kap içine aktarılmaktadır. İçine numune alınan kabın iç vanalar tekrar kapatılarak sistemle bağlantısı kesilmekte ve dış tarafındaki rakorlar yardımıyla sistemden ayrılabilir. Kap sirkülasyon hattından ayrıldığında dış vanalar da kapatılmakta, böylelikle sirkülasyonun bozulması engellenmektedir. Örnek toplama kabı sisteme tekrar monte edildiğinde içinde denge şartlarını bozabilecek hava kalmaması için vakumlanması gerekmektedir. Bu amaçla örnek toplama kabı üzerine vakum yapılabilecek bir vana monte edilmiştir.



Şekil 3.9 Sirkülasyon Hattının Hazneye Bağlantısı



Şekil 3.10 Pompa



Şekil 3.11 Örnek Toplama Kabı

3.1.3. Viskozimetre

Deney sisteminde yağ-soğutkan karışımının viskozitesinin ölçülmesi amacıyla eş zamanlı ölçüm alabilen bir viskozimetre kullanılmıştır. Viskozite ölçümü “Cambridge Applied Systems” firması tarafından üretilen akış hattı üzerine monte edilebilen minyatür bir sensör ve sensörün elektriksel çıktısını dinamik viskozite birimine dönüştüren elektronik birimden oluşan bir viskozimetre ile yapılmaktadır. Sensör sıvı fazda çalışmaktadır ve olası gaz kabarcıkların etkisini minimize etmek için yağ-soğutkan karışımının sirküle edildiği hatta yaklaşık 45°lik açı ile monte edilmiştir. Viskozimetre sensörü ve sirkülasyon hattına bağlantısı Şekil 3.12’de görülmektedir. Viskozimetre sensörü içerisinde bulunan bir piston yardımıyla akışkanın viskozitesini ölçmektedir. Farklı viskozite aralıkları için farklı büyüklükte piston kullanılmaktadır. Kullanılan viskozimetre elektronik biriminde 0.5-10 cP ve 10-200 cP aralıklarında ölçüm yapılabilmekte ve her iki viskozite aralığının da ayrı pistonları bulunmaktadır. Deneyler sırasında bu pistonların çalışılan viskozite aralığına göre değiştirilmesi gerekmektedir. Viskozimetre cihazı deneylerden önce üretici firmaya gönderilerek 10-200 cP aralığında çalışan piston eklenmiş ve

kalibrasyonu yaptırılmıştır. 0.5-10 cP aralığında çalışan pistonun kalibrasyonu ise cihazın kullanım kılavuzunda yer alan açıklamaları takip ederek üretici firma desteği olmadan yapılmıştır. [29].



Şekil 3.12 Viskozimetre Sensörü

3.1.4. Yalıtım Kabini

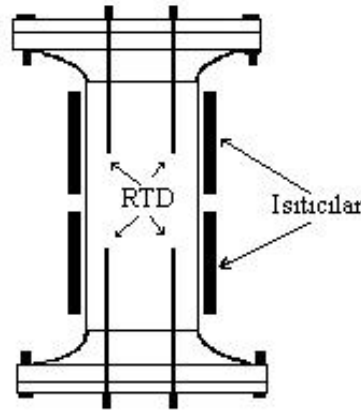
Yağ-soğutkan karışım haznesi ve sirkülasyon hattı yalıtım amacıyla bir buzdolabı içerisine yerleştirilmiştir. Dolap ön kapağına sistemin deney sırasında izlenebilmesi amacıyla pencere açılmıştır (Şekil 3.13). Örnek toplama kabı da küçük bir soğutucu kabini kullanılarak dış ortamdan yalıtılmıştır. Karışım haznesi ve sirkülasyon hattının yalıtılması amacıyla kullanılan buzdolabı gerektiğinde sistemin soğutulması amacıyla da kullanılabilir.

3.1.5. Sıcaklık Kontrolü

Pompa vasıtasıyla sirkülasyon halinde bulunan yağ-soğutkan karışımının sıcaklığı hazne etrafına yerleştirilen her biri 375 Watt güce sahip 4 adet ısıtıcı ile ayarlanmaktadır. Hazne içindeki karışımın sıcaklığı 4 adet RTD (Resistance Temperature Detector) ile sürekli olarak tespit edilmektedir. Üstteki bir RTD vasıtası ile üst ısıtıcılara, alttaki bir RTD vasıtası ile de alt ısıtıcılara kontrol uygulanmaktadır (Şekil 3.14).

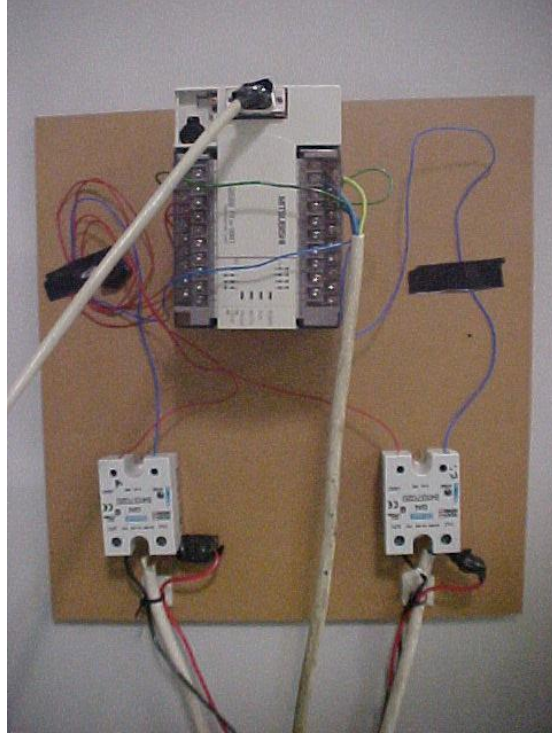


Şekil 3.13 Yalıtım Kabini



Şekil 3.14 Isıtıcı ve RTD'lerin Yerleşimi

RTD sıcaklık verileri doğrultusunda ısıtıcı gücünün kontrolü PID kontrol mekanizması ile sağlanmakta ve bu kontrol PLC (Programlanabilir Denetleyici) kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Sıcaklık verileri ve istenen sıcaklık değeri doğrultusunda alınan çıkış sinyalleri üst ve alt ısıtıcılar için elektrik panosunda bulunan rölelere kumanda etmekte ve PLC röle üzerinden geçen elektrik akımını ayarlayarak ısıtıcılara gerekli gücün verilmesini sağlamaktadır. Şekil 3.15'te PID tipi kontrolün sağlanmasında kullanılan PLC ünitesi görülmektedir.

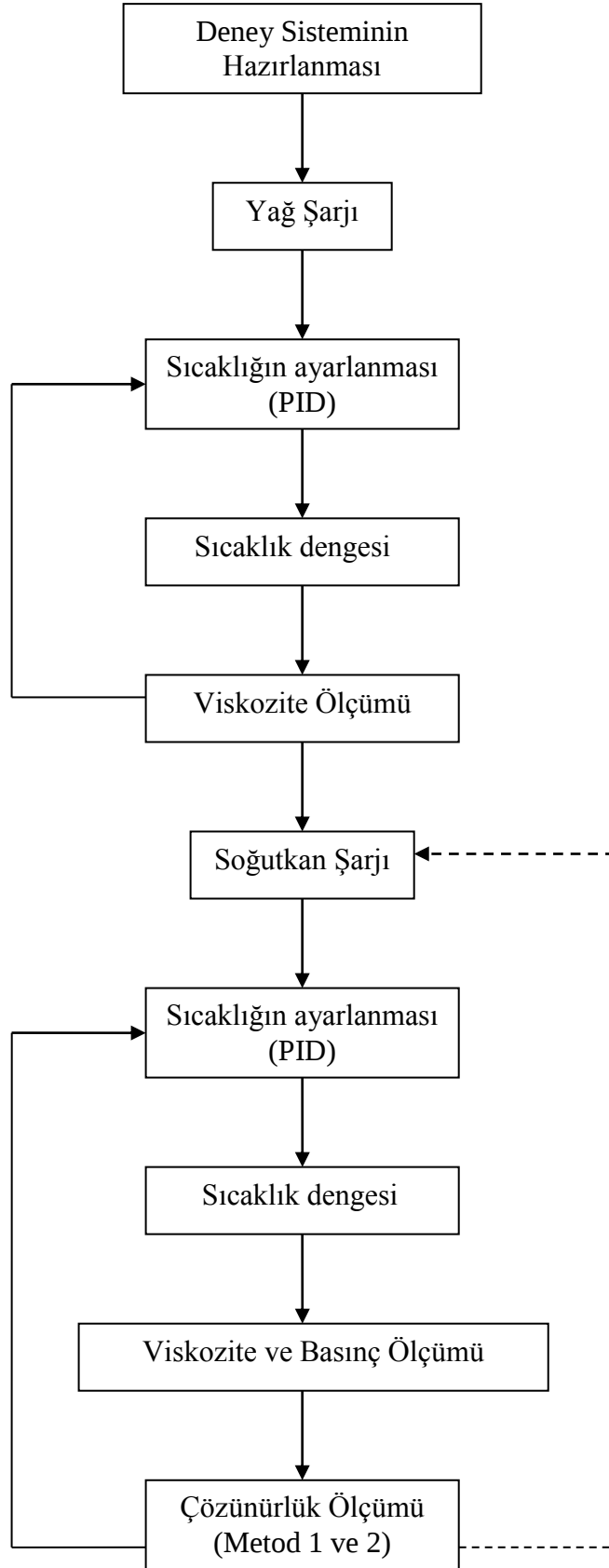


Şekil 3.15 PLC

3.2.Deneysel Çalışma Yöntemi

Bu bölümde işletmeye alınan deney sistemi kullanılarak buzdolabı kompresörlerindeki yağ-soğutkan karışımlarının soğutkan çözünürlüğü ve karışım viskozitesi bilgilerinin elde edilmesi amacıyla oluşturulan deneysel çalışma yönteminin açıklanması amaçlanmıştır. Deneysel çalışma yönteminin oluşturulmasında Grebner [22] ile Jacobi [19] ve arkadaşlarının geliştirdiği yöntem de dikkate alınmıştır. Deneysel çalışma yönteminin akım şeması Şekil 3.16'da yer almaktadır.

Deneylerden önce deney sisteminin hazırlanması gerekmektedir. Bu amaçla yağ numunesi şarj edilmeden önce karışım haznesi ve sirkülasyon hattı etil alkol ile temizlenmektedir. Temizleme işleminin etkin olması için pompa çalıştırılarak etil alkolün tüm sistemde dolaştırılması sağlanmaktadır. Temizleme işleminden sonra karışım haznesine yağ numunesi şarj edilmektedir. Şarj edilecek yağ numunesi önceden tartılarak sisteme şarj edilen toplam yağ miktarı belirlenmektedir.



Şekil 3.16 Deneysel Çalışma Yöntemi Akım Şeması

Şarj işleminden sonra yağ numunesinin sıcaklığı karışım haznesi üzerinde bulunan ısıtıcılar yardımıyla istenen deney sıcaklığına getirilmektedir. Deney sıcaklığı PID kontrol edici programı üzerinden tanımlanarak hassas bir şekilde ayarlanabilmektedir. Ayrıca pompa yardımıyla yağ deney sisteminde dolaştırılmakta, böylelikle yağ numunesinin homojen bir sıcaklık dengesine ulaşması sağlanmaktadır. Deneyler sırasında sistemin dengeye ulaşması hazne içinde 4 farklı noktada bulunan RTD sıcaklık sensörü ile kontrol edilmektedir.

Ayarlanan deney sıcaklığına ulaşılmasından sonra elektronik viskozimetre cihazı ile yağ numunesinin viskozitesi ölçülmektedir. Viskozite ölçümünden sonra bir önceki adımda açıklandığı gibi tekrar yeni bir deney sıcaklığı ayarlanarak bu sıcaklıktaki viskozite ölçülmektedir. Bu şekilde farklı sıcaklıklarda ölçülen viskozite değeri ile çalışılan kompresör yağının sıcaklık-viskozite ilişkisi elde edilebilmektedir. Bu tez çalışmasındaki tüm deneylerde 40, 50 60, 70 ve 80°C sıcaklık değerlerinde çalışılmıştır. Bu sıcaklık değerlerinin seçilmesinin nedeni; buzdolabı kompresörlerinde çalışma sırasında yağ sıcaklığının yaklaşık 65°C olması ve deney sıcaklıklarının bu çalışma sıcaklığını kapsamaları istenmesidir.

Kompresör yağının sıcaklık-viskozite ilişkisi yukarıdaki adımlarda tanımlanan şekilde çalışıldıktan sonra yağ-soğutkan karışım özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla deney sisteminde bulunan yağ üzerine soğutkan şarjı yapılmaktadır. Soğutkan şarjından önce yalıtım amaçlı kullanılan buzdolabı ile sistem ve dolayısıyla içindeki yağ numunesi soğutularak, karışım haznesi vakumlanmaktadır. Bu sayede soğutkan şarjı hızlı ve kolay bir şekilde yapılabilir. Şarj edilen soğutkan miktarı soğutkan tüpünün şarj öncesi ve sonrası tartılmasıyla belirlenebilmektedir. Soğutkan şarjından sonra pompa çalıştırılarak yağ ve soğutkanın devamlı olarak boru hattında dolaştırılması, böylelikle etkin bir karıştırma ve sıcaklık dengesinin oluşması sağlanmaktadır. Deney sıcaklığı önceki adımlarda anlatıldığı gibi PID kontrol edici yardımıyla hassas bir şekilde ayarlanmakta ve dengeye ulaşmaktadır.

Ayarlanan deney sıcaklığının dengeye ulaşılmasından sonra, yağ-soğutkan karışımının viskozite ve buhar basıncı ölçülmektedir. Viskozimetre sensörü boru hattına monte edildiğinden karışımın sıvı faz viskozitesini, basınç sensörü ise haznenin üst tarafına monte edildiği için karışımın buhar basıncını ölçmektedir.

Yağ içinde çözünerek yağ-soğutkan karışımını oluşturan soğutkanın miktarını hesaplamak için iki yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemler; karışım haznesi üzerine yerleştirilen seviye cetveli yardımıyla karışım hacmindeki değişimin belirlenmesi ve örnek toplama kabı kullanılarak karışımın ve soğutkanın ağırlığının belirlenmesidir. Yağ içinde soğutkan çözünürlüğünün belirlenmesi için kullanılan bu yöntemler aşağıda detaylı olarak anlatılmaktadır. Çözünürlük değerinin hesaplanmasından sonra yeni bir sıcaklık değerinde yukarıda anlatılan işlemler tekrarlanmaktadır. Tüm sıcaklık noktalarında deney yapıldıktan sonra sistem vakumlanarak farklı miktarda soğutkan şarj edilmektedir. Böylelikle farklı soğutkan çözünürlüğü değerlerinde karışımın viskozite-basınç-sıcaklık ilişkisi elde edilmiş olmaktadır.

3.2.1. Seviye Cetveli Kullanılarak Yağdaki Soğutkan Çözünürlüğünün Saptanması

Soğutkan çözünürlüğünün saptanması için kullanılabilecek seviye cetveli yardımıyla karışım hacmindeki değişimin belirlenmesi yöntemi aşağıda anlatılmaktadır.

Deney sisteminde yağ içinde çözünen soğutkanın ağırlıkça oranı (w_s):

$$w_s = \frac{m_{S(SIV)}}{m_{S(SIV)} + m_{YAĞ}} \quad (3.1)$$

$m_{YAĞ}$: Deney sistemindeki toplam yağ kütesidir.

$m_{S(SIV)}$: Deney sistemindeki yağ-soğutkan karışımının sıvı fazındaki soğutkan kütesidir:

$$m_{S(SIV)} = m_{S(T)} - m_{S(BUHAR)} \quad (3.2)$$

$m_{S(T)}$: Deney sistemindeki toplam soğutkan kütesidir.

$m_{S(BUHAR)}$: Deney sistemindeki yağ-soğutkan karışımının buhar fazındaki soğutkan kütesidir:

$$m_{S(BUHAR)} = (V_T - V_{SIV}) \rho_{BUHAR} \quad (3.3)$$

ρ_{BUHAR} : Deney sistemindeki yağ-soğutkan karışımının buhar fazındaki soğutkan yoğunluğudur.

V_T : Deney sisteminin toplam hacmidir (3850 ml)

V_{SIVI} : Deney sistemindeki sıvı hacmidir.

Deney sistemindeki sıvı hacmi daha önce kalibre edilen seviye cetveli yardımıyla belirlenmektedir. Deney sistemindeki toplam yağ ve soğutkan miktarı deney başlangıcında karışım haznesine şarj edilen yağ ve soğutkan miktarıdır. Deney sistemindeki buhar fazındaki soğutkanın yoğunluğu ise basınç ve sıcaklık değeri göz önüne alınarak soğutkan ile ilgili termodinamik özellik tablolarından bulunabilmektedir [18].

3.2.2. Örnek Toplama Kabı Kullanılarak Yağdaki Soğutkan Çözünürlüğünün Saptanması

Yağ içinde çözünen soğutkan miktarı (soğutkanın ağırlıkça oranı, w_s) örnek toplama kabı verileri kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanabilmektedir:

$$w_s = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_{KAP}} \quad (3.4)$$

$$m_1 = m_{S(T)} + m_{YAĞ} + m_{KAP} \quad (3.5)$$

$$m_2 = m_{YAĞ} + m_{KAP} \quad (3.6)$$

$m_{S(T)}$: Örnek toplama kabı içerisindeki toplam soğutkan ağırlığıdır.

$m_{YAĞ}$: Örnek toplama kabı içerisindeki yağ ağırlığıdır.

m_{KAP} : Örnek toplama kabının ağırlığıdır.

m_1 : Karışım örneği ve örnek toplama kabının toplam ağırlığıdır.

m_2 : Karışım örneğinin içerisindeki yağın ve örnek toplama kabının toplam ağırlığıdır.

Soğutkan-yağ karışımı dengeye ulaştığında, örnek toplama kabının vanası açılarak karışımdan numune alınmaktadır. Örnek alındıktan sonra valf kapatılmakta ve kap hassas terazi ile tartılmaktadır. Örnek alınıp toplam kütle ölçüldükten sonra örnekleme kabının üzerindeki valf açılarak karışım içerisindeki soğutkanın yağı terk etmesi sağlanmaktadır. Soğutkanın tamamen yağdan ayrılması için kabın ısıtılması bu işlemi hızlandıracaktır.

Bu çalışmada gerçekleştirilen deneylerde numune kabı içindeki soğutkan ve yağ ağırlığının kap ağırlığına kıyasla oldukça küçük olması ve hassas ölçülememesi nedeniyle soğutkan çözünürlüğü seviye cetveli kullanılarak hesaplanmıştır.

3.3. Deney Numunelerinin Özellikleri

Deneyisel çalışmada buzdolabı yağ-soğutkan kompresörleri için yağ içinde çözünen soğutkan ve karışım viskozitesi özelliklerinin incelenmesi amacıyla kullanılan mineral ve POE kompresör yağları özellikleri Tablo 3.1 ve 3.2’de verilmektedir. Kullanılan R600a ve R134a soğutkanları % 99.9 saflığa sahip ticari soğutkanlardır. Kompresör yağları ve soğutkanlarla ilgili bilgiler üretici firmalardan elde edilmiştir.

Tablo 3.1 Kullanılan Mineral Yağların Özellikleri

Kod	Mineral Yağ-1	Mineral Yağ-2
Yağ Cinsi	Naftenik Mineral Yağ	Naftenik Mineral Yağ
Viskozite (@40°C, cSt)	9.4	21.9
Viskozite (@100°C, cSt)	2.4	3.6
Yoğunluk (@15°C, kg/m ³)	882	904

Tablo 3.2 Kullanılan Polyol Ester Yağların Özellikleri

Kod	POE-1	POE-2
Yağ Cinsi	Polyol Ester Yağ	Polyol Ester Yağ
Viskozite (@40°C, cSt)	9.9 cSt	18.9 cSt
Viskozite (@100°C, cSt)	2.7 cSt	4.2 cSt
Yoğunluk (@20°C, kg/m ³)	946 kg/m ³	995 kg/m ³

3.4. Deney Sistemi ve Yönteminin Kontrolü

Bu bölümde işletmeye alınan deney sistemi ve geliştirilen deney yönteminin kontrolü amacıyla yapılan çalışmalar sunulmaktadır. Deney sisteminden alınan basınç ve viskozite verileri, hesaplanan çözünürlük değerleri ve şarj edilen soğutkan miktarının sonuçlar üzerinde oldukça etkili olması nedeniyle bu parametrelerin incelenmesine karar verilmiştir. Bu nedenle deney sonuçlarının hassasiyeti, farklı soğutkan şarj oranlarında deney sonuçlarında görülen değişim ve bir yağ-soğutkan çifti kullanılarak elde edilen deney sonuçları ile aynı çift için yağ üretici firmada elde

edilen sonuçların karşılaştırılması üzerine gerçekleştirilen çalışmalar aşağıda anlatılmaktadır.

Deney sonuçları hassasiyetinin ve şarj edilen soğutkan miktarındaki değişimin deney sonuçlarına etkisinin görülmesi amacıyla yapılan çalışmada 90 ve 95 gram R600a soğutkan şarj miktarlarında iki deney gerçekleştirilmiştir. Tablo 3.3'te 30°C sıcaklıkta iki farklı R600a şarj miktarı için (90g ve 95g) basınç ve viskozite ölçüm sonuçları verilmiştir. Aynı miktar şarj için yapılan deneylerdeki sapma değerlerine bakıldığında basınç ve viskozite ölçümlerinde tekrarlanabilirliğin oldukça iyi olduğu kanaatine varılmıştır.

Tablo 3.3 Deney Sonuçlarının Hassasiyeti

T=30°C	R600a : 90 g		R600a : 95 g	
	Basınç (bar)	Viskozite (cP)	Basınç (bar)	Viskozite (cP)
Ölçüm 1	1.170	5.15	1.302	5.02
Ölçüm 2	1.176	5.20	1.304	4.95
Ortalama	1.173	5.18	1.303	4.99
Sapma (%)	0.51	0.97	0.15	1.40

Tablo 3.4'te ise şarj miktarındaki değişimin basınç ve viskozite sonuçları üzerindeki etkisi görülmektedir. Yapılan deneyde hazne içinde 1750 gr. yağ bulunmaktadır. Bu nedenle şarj edilen soğutkan/yağ oranı ağırlıkça yaklaşık 0.05 olmaktadır. Sonuçlara dikkat edildiğinde şarj miktarındaki 5 gramlık bir farkın (yağ-soğutkan şarj oranında ağırlıkça %0.29 R600a'ya karşılık gelmektedir) basınç ve viskozite üzerinde önemli bir değişime neden olduğu görülmektedir. Deney sistemine verilen soğutkan doğrudan soğutkan tüpünden şarj edildiği için çok hassas bir şekilde kontrol edilememektedir. Bu nedenle şarj edilen soğutkan miktarı hassas olarak tartılmalı, gerektiğinde şarj işlemi tekrarlanmalıdır.

Tablo 3.4 Soğutkan Şarjı Miktarındaki Değişimin Sonuçlar Üzerindeki Etkisi

T=30°C	Basınç (bar)	Viskozite (cP)
90 g	1.173	5.18
95 g	1.303	4.99
Fark (%)	11.1	3.9

Deney sonuçlarının tutarlılığının incelenmesi amacıyla Mineral Yağ-1 kodlu kompresör yağı örneği ile R600a soğutkan çifti karışımı aşağıdaki şartlarda deney

yapılarak, deney sonuçları yağ üretici firma tarafından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Deney şartları aşağıda verilmektedir:

- Deney Sıcaklıkları: 30, 50 ve 80°C
- Yağ miktarı: 1746 g
- Soğutkan miktarları: 91.9 ve 194.5 g

Yağ ve soğutkan miktarları; üreticiden alınan verilerde karışım ağırlıkça %5 ve %10 oranında çözünen R600a olarak verildiğinden, kolay karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla R600a şarj miktarı oranları da bu mertebelerde olacak şekilde seçilmiştir.

Yukarıda belirtilen şartlarda ve Bölüm 3.2’de verilen deneysel çalışma yöntemi takip edilerek elde edilen deney sonuçları ile yağ üretici firma tarafından elde edilen karışım viskozitesi ve çözünürlük bilgilerinin karşılaştırılması Tablo 3.5’de verilmektedir.

Tablo 3.5 Deney Sistemi ve Yağ Üretici Firma Tarafından Elde Edilen Sonuçlarının Karşılaştırılması

Sıcaklık (°C)	Basınç (bar)	Çözünürlük (Ağır. %’si)		Çözünürlük Fark (%)	Viskozite (cSt)		Viskozite Fark (%)
		Deneysel	Üretici		Deneysel	Üretici	
30	0.00	0.00	0.00	-	13.10	14.00	6.4
	0.90	4.81	4.90	1.8	7.65	8.00	4.4
	1.57	9.73	9.80	0.7	5.37	5.00	7.4
50	0.00	0.00	0.00	-	6.94	6.90	0.6
	1.50	4.66	4.90	4.9	4.15	4.30	3.5
	2.51	9.59	9.75	1.6	3.29	3.20	2.8
80	0.00	0.00	0.00	-	3.28	3.40	3.5
	2.60	4.49	4.80	6.5	2.45	2.60	5.8
	4.42	9.34	9.60	2.7	1.97	1.90	3.7
Ortalama Fark	-	-	-	3.0	-	-	4.2

Tablo 3.5’te yer alan viskozite ve R600a çözünürlüğü sonuçları ile aynı sıcaklık ve buhar basıncı değerleri için yağ üretici firma tarafından elde edilen değerler karşılaştırıldığında; aynı sıcaklık ve basınç değeri için R600a çözünürlüğünde % 3.0 ortalama fark, aynı sıcaklık ve çözünürlük değeri için viskozite değerinde % 4.2 ortalama fark görülmektedir. Bu nedenle ölçüm sonuçları ile üretici sonuçları arasındaki farkın kabul edilebilecek sınırlar içinde olduğu, tasarlanan deney sistemi

ve yönteminin yağ içinde soğutkan çözünürlüğü ve karışım viskozitesi özelliklerinin belirlenmesi için uygun olduğu kanaatine varılmıştır.

3.5. Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Bu bölümde Mineral Yağ-1 - R600a, Mineral Yağ-2 - R600a, POE-1 - R134a ve POE-2 – R134a çiftleri için elde edilen sıcaklık ve basınca bağlı olarak değişen yağ içinde soğutkan çözünürlüğü ve karışım viskozitesi sonuçları ve değerlendirilmesi sunulmaktadır.

3.5.1. Mineral Yağ-R600a Çifti Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Mineral Yağ-R600a çifti ile yapılan çalışmalarda iki farklı özellikte mineral kompresör yağı ve ticari R600a soğutkanı (safılık değeri: %99.9) kullanılmıştır. Mineral Yağ-1 ve Mineral Yağ-2 kodlu mineral kompresör yağları ve R600a soğutkanı kullanılarak yapılan deneyler ve sonuçları hakkında bilgi aşağıda verilmektedir. Her iki yağ-soğutkan çifti için deneyler; 40, 50, 60, 70 ve 80°C sıcaklıklarda yapılmıştır. Yağ ve soğutkan şarj miktarları ağırlıkça %5 ve %10 oranında soğutkan şarjı olarak olacak şekilde seçilmiştir.

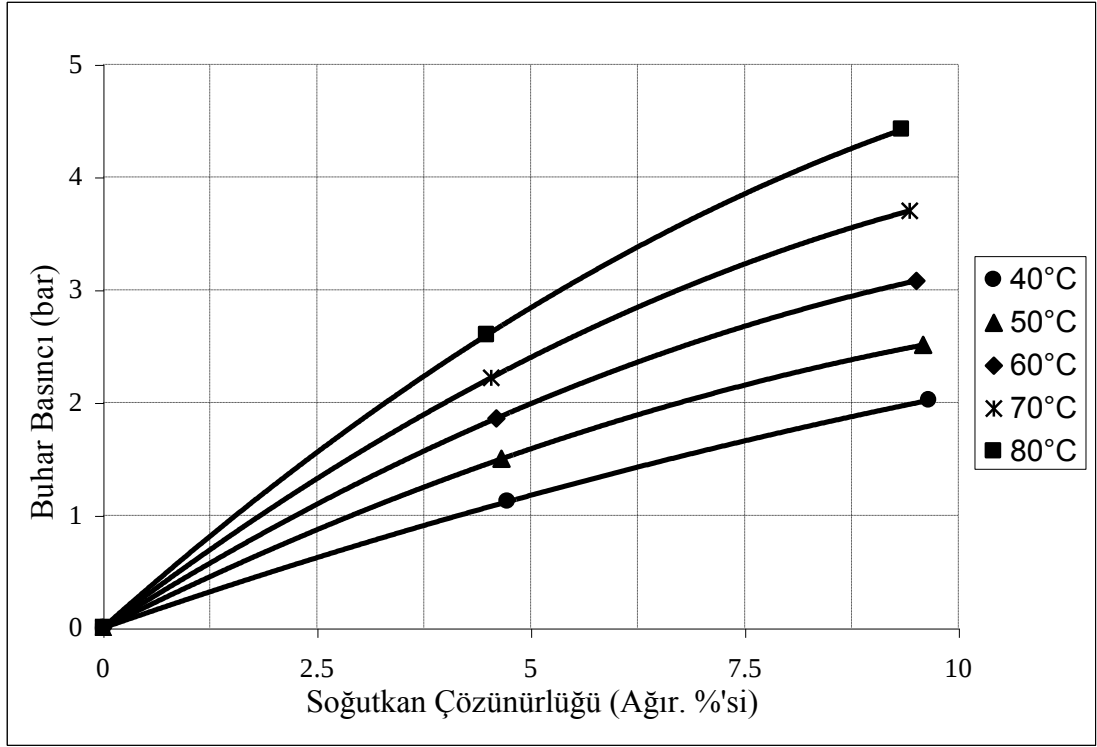
Mineral Yağ-1 - R600a çifti için deney şartları aşağıda verilmektedir:

- Yağ miktarı: 1746 g
- Soğutkan miktarları: 91.9 ve 194.5 g

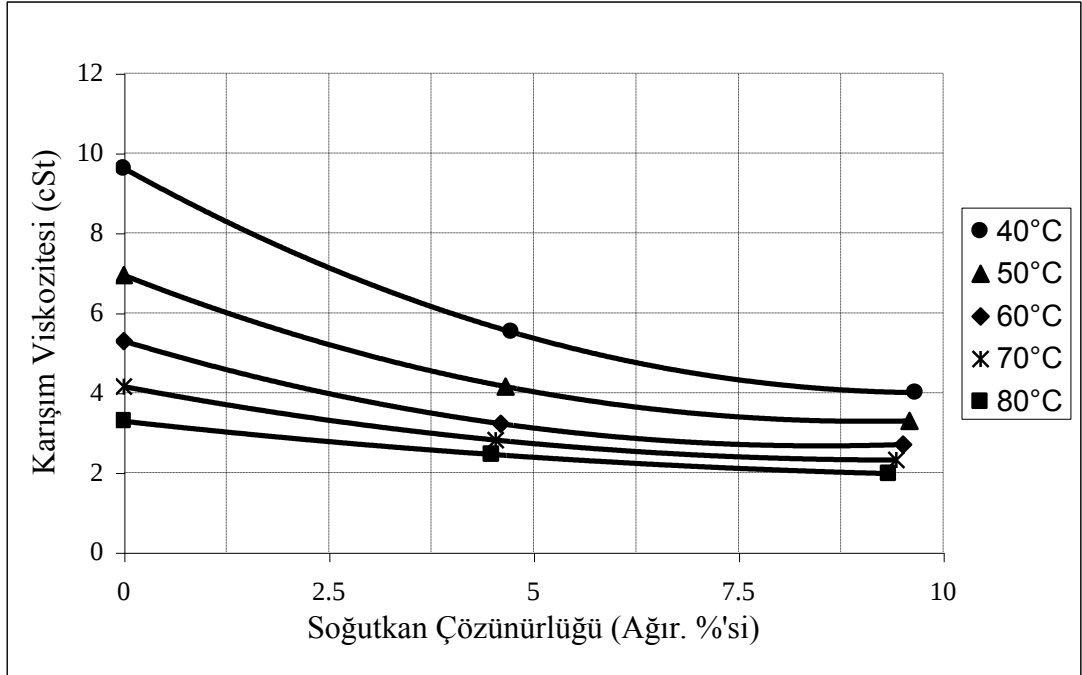
Deneyler sonucunda Mineral Yağ-1 - R600a için elde edilen değişen sıcaklıklarda yağ içinde soğutkan çözünürlüğü-buhar basıncı ve karışım viskozitesi-yağ içinde soğutkan çözünürlüğü ilişkileri Şekil 3.17 ve 3.18’de görülmektedir.

Şekil 3.17 incelendiğinde tüm sıcaklık değerlerinde %5 ve %10 oranında şarj edilen soğutkan kütlesinin büyük bir kısmının (sırasıyla yaklaşık >%4 ve >%9) yağ içinde çözüldüğü, geri kalan kısmında karışımın buhar fazını oluşturduğu görülmektedir. Eşit şarj oranında ise (sadece %5 ya da % 10 şarj oranı dikkate alındığında) sıcaklık artışı ile yağ içinde soğutkan çözünürlüğü azalmaktadır. Örneğin; soğutkan/yağ şarj oranı %5 olduğunda 40°C’deki yağ içinde soğutkan çözünürlüğü ağırlıkça %4.73 değerindeyken, aynı şarj oranı için 80°C’deki yağ içinde soğutkan çözünürlüğü ağırlıkça %4.49 olmaktadır. Bu sonuç gaz çözünürlüğünün sıcaklık ile ters orantılı

bir ilişkiye sahip olduğu bilgisini desteklemektedir. Karışım buhar basıncı ise sıcaklık ve çözünürlük artışı ile yükselmektedir



Şekil 3.17 Mineral Yağ-1 – R600a Çifti İçin Değişen Sıcaklıklarda Yağ İçinde Soğutkan Çözünürlüğü – Buhar Basıncı İlişkisi



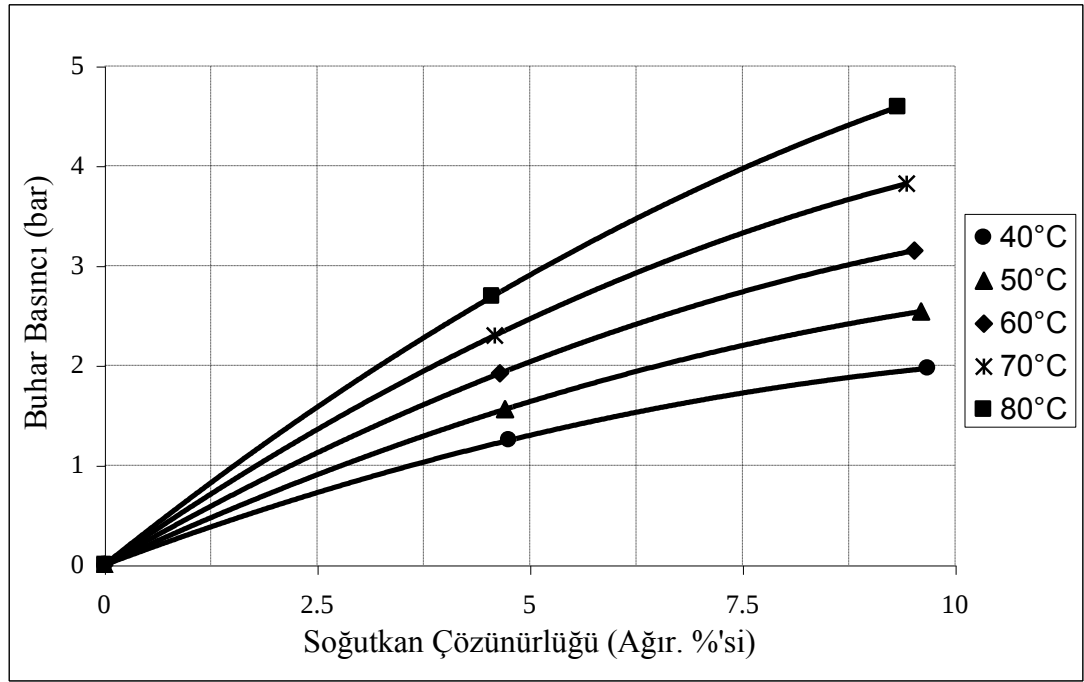
Şekil 3.18 Mineral Yağ-1 – R600a Çifti İçin Değişen Sıcaklıklarda Yağ İçinde Soğutkan Çözünürlüğü-Karışım Viskozitesi İlişkisi

Şekil 3.18 incelendiğinde karışım viskozitesinin sıcaklık arttıkça ve tek bir sıcaklık değeri dikkate alındığında yağ içinde soğutkan çözünürlüğünün artması ile azaldığı görülmektedir. Yağ viskozitesi 40°C’de ve soğutkan çözünürlüğünün olmadığı durumda 9.62cSt kinematik viskozite değerine sahipken, içinde ağırlıkça % 9.34 soğutkan çözündüğü ve sıcaklığın 80°C olduğu durumda 1.97cSt kinematik viskozite değerine sahiptir.

Mineral Yağ-2 - R600a çifti için deney şartları aşağıda verilmektedir:

- Yağ miktarı: 1804 g,
- Soğutkan miktarları: 95 g ve 200.5 g.

Deneyler sonucunda Mineral Yağ-2 - R600a için elde edilen değişen sıcaklıklarda yağ içinde soğutkan çözünürlüğü-buhar basıncı ve karışım viskozitesi-yağ içinde soğutkan çözünürlüğü ilişkileri Şekil 3.19 ve 3.20’de sunulmaktadır.

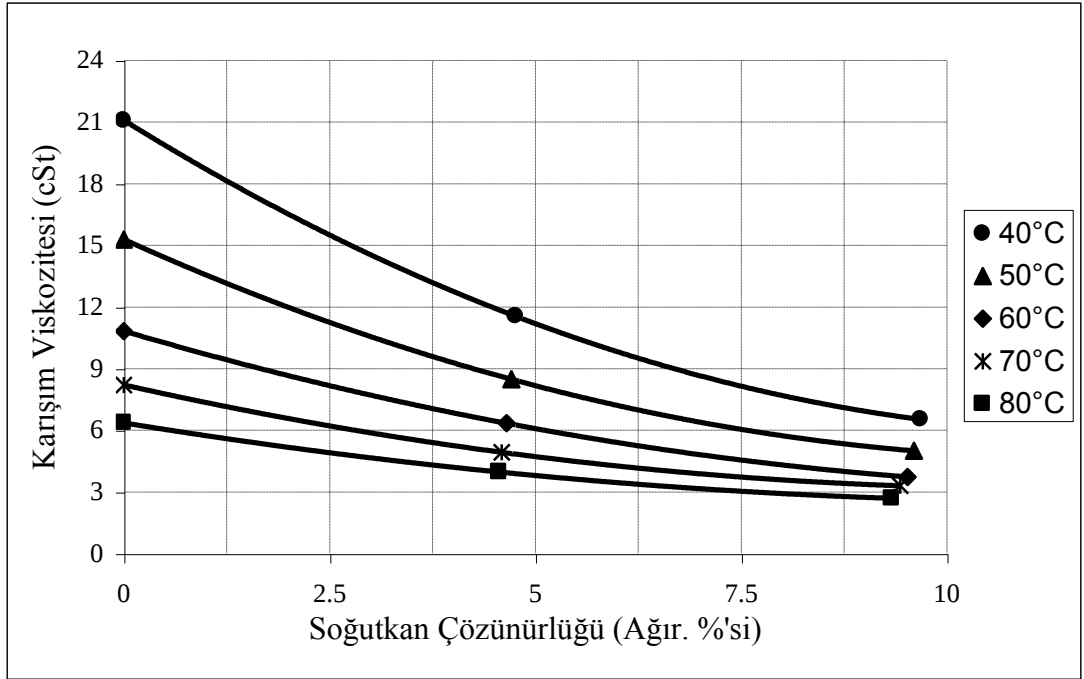


Şekil 3.19 Mineral Yağ-2 – R600a Çifti İçin Değişen Sıcaklıklarda Yağ İçinde Soğutkan Çözünürlüğü – Buhar Basıncı İlişkisi

Şekil 3.19 incelendiğinde bir önceki örnekte olduğu gibi tüm sıcaklık değerlerinde %5 ve %10 oranında şarj edilen soğutkan kütlesinin büyük bir kısmının (sırasıyla yaklaşık >%4 ve >%9) yağ içinde çözündüğü, geri kalan kısmında karışımın buhar fazını oluşturduğu görülmektedir. Eşit şarj oranında ise sıcaklık artışı ile yağ içinde soğutkan çözünürlüğü azalmaktadır. Soğutkan/yağ şarj oranı %5 olduğunda

40°C'deki yağ içinde soğutkan çözünürlüğü ağırlıkça %4.76 değerindeyken, aynı şarj oranı için 80°C'deki yağ içinde soğutkan çözünürlüğü ağırlıkça %4.56 olmaktadır. Karışım buhar basıncı ise sıcaklık ve çözünürlük artışı ile yükselmektedir.

Şekil 3.20 incelendiğinde ise karışım viskozitesinin sıcaklık arttıkça ve tek bir sıcaklık değeri dikkate alındığında yağ içinde soğutkan çözünürlüğünün artması ile azaldığı görülmektedir. Yağ viskozitesi 40°C'de ve soğutkan çözünürlüğünün olmadığı durumda 21.09cSt kinematik viskozite değerine sahipken, içinde ağırlıkça % 9.33 soğutkan çözündüğü ve sıcaklığın 80°C olduğu durumda 2.69cSt kinematik viskozite değerine sahiptir.



Şekil 3.20 Mineral Yağ-2 – R600a Çifti İçin Değişen Sıcaklıklarda Yağ İçinde Soğutkan Çözünürlüğü-Karışım Viskozitesi İlişkisi

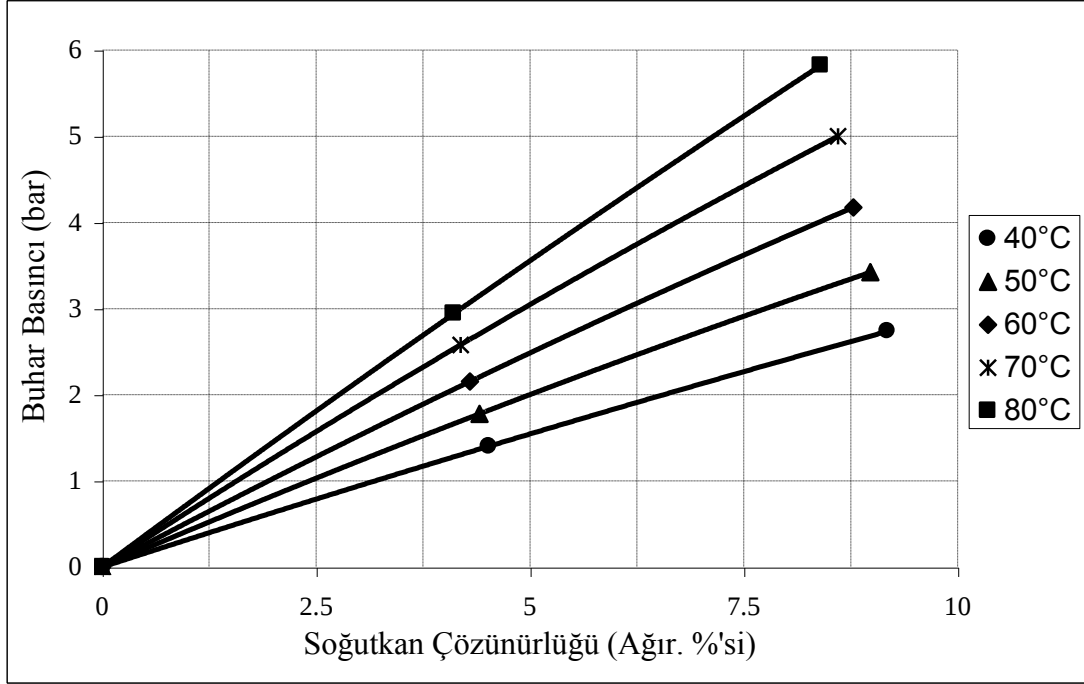
3.5.2. POE-R134a Çifti Sonuçları ve Değerlendirilmesi

POE-R134a çifti ile yapılan çalışmalarda iki farklı özellikte POE kompresör yağı ve ticari R134a soğutkanı (safılık değeri: %99.9) kullanılmıştır. POE-1 ve POE-2 kodlu kompresör yağları ve R134a soğutkanı kullanılarak yapılan deneyler ve sonuçları hakkında bilgi aşağıda verilmektedir. Her iki yağ-soğutkan çifti için deneyler; 40, 50, 60, 70 ve 80°C sıcaklıklarda yapılmıştır. Yağ ve soğutkan şarj miktarları ağırlıkça %5 ve %10 oranında soğutkan şarjı olarak olacak şekilde seçilmiştir.

POE-1 – R134a çifti için deney şartları aşağıda verilmektedir:

- Yağ miktarı: 1873.4 g
- Soğutkan miktarları: 98.6 g ve 208.2 g

Deneyler sonucunda POE-1 – R134a için elde edilen değişen sıcaklıklarda yağ içinde soğutkan çözünürlüğü-buhar basıncı ve karışım viskozitesi-yağ içinde soğutkan çözünürlüğü ilişkileri Şekil 3.21 ve 3.22’de görülmektedir.

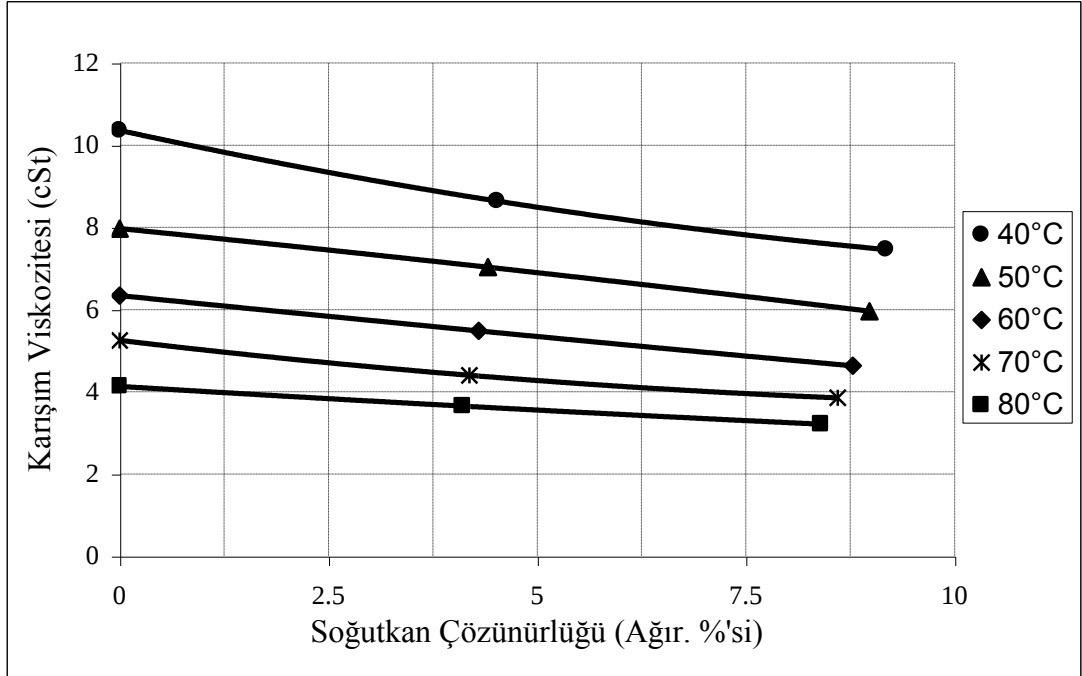


Şekil 3.21 POE-1 – R134a Çifti İçin Değişen Sıcaklıklarda Yağ İçinde Soğutkan Çözünürlüğü-Karışım Viskozitesi İlişkisi

Şekil 3.21 incelendiğinde Mineral Yağ-R600a çifti sonuçlarında olduğu gibi tüm sıcaklık değerlerinde %5 ve %10 oranında şarj edilen soğutkan kütlelerinin büyük bir kısmının (sırasıyla yaklaşık >%4 ve >%8) yağ içinde çözündüğü, geri kalan kısmının da karışımın buhar fazını oluşturduğu görülmektedir. Eşit şarj oranında ise sıcaklık artışı ile yağ içinde soğutkan çözünürlüğü azalmaktadır. Örneğin; soğutkan/yağ şarj oranı %5 olduğunda 40°C’deki yağ içinde soğutkan çözünürlüğü ağırlıkça %4.52 değerindeyken, aynı şarj oranı için 80°C’deki yağ içinde soğutkan çözünürlüğü ağırlıkça %4.11 olmaktadır. Karışım buhar basıncı ise sıcaklık ve çözünürlük artışı ile yükselmektedir.

Şekil 3.22 incelendiğinde ise karışım viskozitesinin sıcaklık arttıkça ve tek bir sıcaklık değeri dikkate alındığında yağ içinde soğutkan çözünürlüğünün artması ile

azaldığı görülmektedir. Yağ viskozitesi 40°C’de ve soğutkan çözünürlüğünün olmadığı durumda 10.36cSt kinematik viskozite değerine sahipken, içinde ağırlıkça % 8.40 soğutkan çözündüğü ve sıcaklığın 80°C olduğu durumda 3.21cSt kinematik viskozite değerine sahiptir.



Şekil 3.22 POE-1 – R134a Çifti İçin Değişen Sıcaklıklarda Yağ İçinde Soğutkan Çözünürlüğü-Karışım Viskozitesi İlişkisi

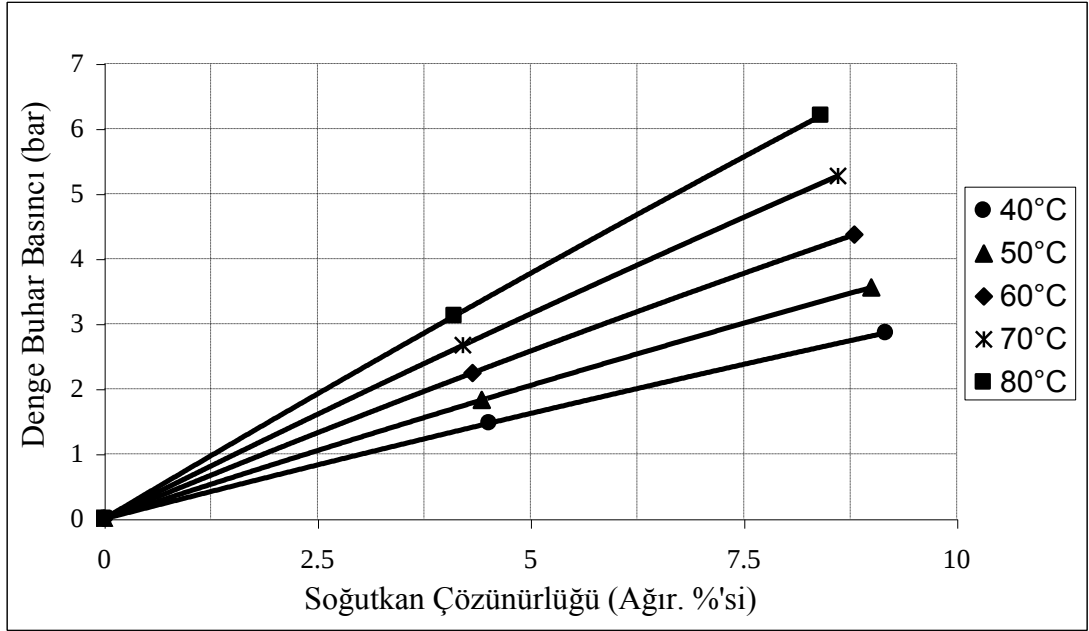
POE-2 – R134a çifti için deney şartları aşağıda verilmektedir:

- Yağ miktarı: 1974.7 g
- Soğutkan miktarları: 103.95 g ve 219.4 g.

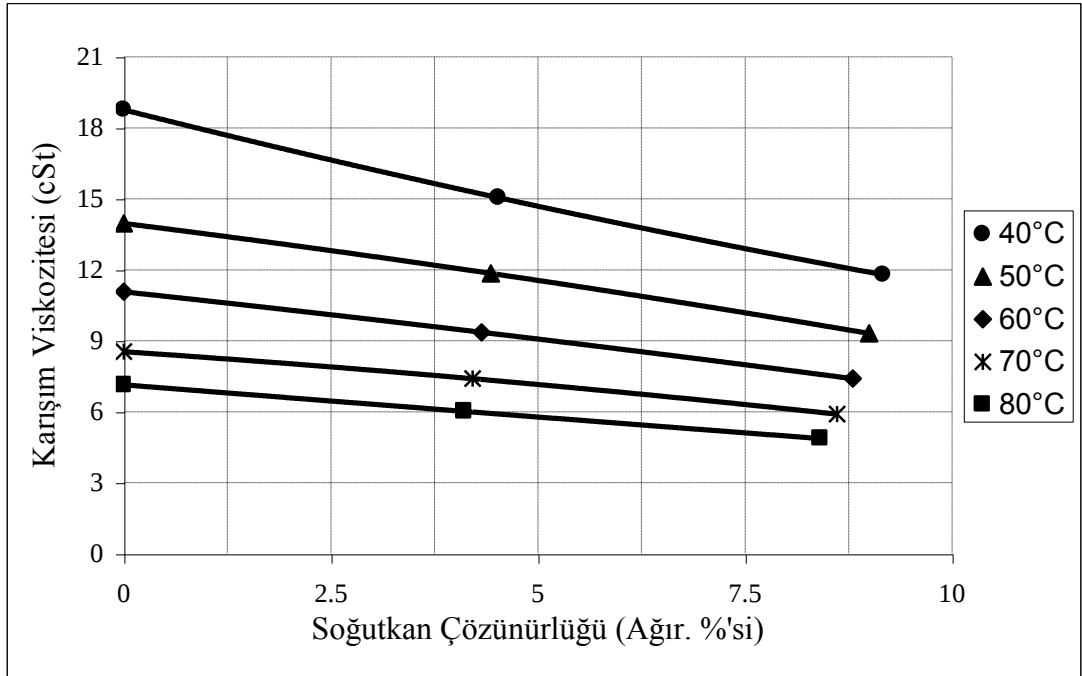
Deneyler sonucunda POE-2 – R134a için elde edilen değişen sıcaklıklarda yağ içinde soğutkan çözünürlüğü-buhar basıncı ve karışım viskozitesi-yağ içinde soğutkan çözünürlüğü ilişkileri Şekil 3.23 ve 3.24'te görülmektedir.

Şekil 3.23 incelendiğinde diğer çift sonuçlarında olduğu gibi tüm sıcaklık değerlerinde %5 ve %10 oranında şarj edilen soğutkan kütlesinin büyük bir kısmının (sırasıyla yaklaşık >%4 ve >%8) yağ içinde çözündüğü, geri kalan kısmının da karışımın buhar fazını oluşturduğu görülmektedir. Eşit şarj oranında ise sıcaklık artışı ile yağ içinde soğutkan çözünürlüğü azalmaktadır. Soğutkan/yağ şarj oranı %5 olduğunda 40°C'deki yağ içinde soğutkan çözünürlüğü ağırlıkça %4.52 değerindeyken, aynı şarj oranı için 80°C'deki yağ içinde soğutkan çözünürlüğü

ağırlıkça %4.11 olmaktadır. Karışım buhar basıncı ise sıcaklık ve çözünürlük artışı ile yükselmektedir.



Şekil 3.23 POE-2 – R134a Çifti İçin Değişen Sıcaklıklarda Yağ İçinde Soğutkan Çözünürlüğü-Karışım Viskozitesi İlişkisi



Şekil 3.24 POE-2 – R134a Çifti İçin Değişen Sıcaklıklarda Yağ İçinde Soğutkan Çözünürlüğü-Karışım Viskozitesi İlişkisi

Şekil 3.24'te ise diğer çift sonuçlarında olduğu gibi karışım viskozitesinin sıcaklık arttıkça ve tek bir sıcaklık değeri dikkate alındığında yağ içinde soğutkan

çözünürlüğünün artması ile azaldığı görülmektedir. Yağ viskozitesi 40°C’de ve soğutkan çözünürlüğünün olmadığı durumda 18.76cSt kinematik viskozite değerine sahipken, içinde ağırlıkça % 8.41 soğutkan çözündüğü ve sıcaklığın 80°C olduğu durumda 4.87cSt kinematik viskozite değerine sahiptir

3.5.3. Mineral Yağ-R600a ve POE-R134a Çifti Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Bu bölümde Mineral Yağ-R600a ve POE-R134a çiftleri ile elde edilen deney sonuçlarının karşılaştırılması verilmektedir.

Mineral Yağ-R600a ve POE-R134a çiftleri için yağ içinde soğutkan çözünürlüğü – buhar basıncı ilişkisi karşılaştırıldığında benzer çözünürlük değerlerindeki buhar basıncı değerlerinin POE-R134a çiftlerinde daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni R134a soğutkanının R600a soğutkanına göre daha yüksek doygunluk buhar basıncı değerlerine sahip olmasıdır. Ayrıca soğutkan/yağ şarj oranları ağırlıkça eşit olmasına rağmen (%5 ve %10), POE-R134a çiftlerinde elde edilen yağ içinde soğutkan çözünürlüğü değerleri Mineral-Yağ-R600a çiftlerine kıyasla daha küçüktür. Bu nedenle POE-R134a çiftlerinde yağ içinde soğutkan çözünürlüğünün daha az olduğu kanaatine varılmıştır. Tablo 3.6’da Mineral Yağ-1 – R600a ve POE-1 – R134a çiftleri için 40°C ve 80°C’deki çözünürlük ve buhar basıncı değerleri verilmektedir.

Tablo 3.6 Yağ-Soğutkan Çiftleri İçin Buhar Basıncı ve Yağ içinde Soğutkan Çözünürlüğü Değerlerinin Karşılaştırılması

Sıcaklık (°C)	Mineral Yağ-1 - R600a		POE-1 - R134a	
	Yağ İçinde Soğutkan Çözünürlüğü (Ağr. %'si)	Buhar Basıncı (bar)	Yağ İçinde Soğutkan Çözünürlüğü (Ağr. %'si)	Buhar Basıncı (bar)
40	4.73	1.12	4.52	1.40
	9.66	2.02	9.18	2.74
80	4.49	2.60	4.11	2.94
	9.34	4.42	8.40	5.82

Mineral Yağ-R600a ve POE-R134a çiftinde daha yüksek viskoziteye sahip yağların kullanıldığı 2 no’lu deneylerde (Mineral Yağ-2 – R600a ve POE-2 – R134a deneyleri) karışım buhar basınçlarının bir miktar yüksek olduğu görülmektedir. Yağ

içinde soğutkan çözünürlüğü değerlerinde net olarak gözükmesi de, buhar basıncı artışının sebebinin yağ içinde çözünen soğutkan miktarındaki azalma olduğu ve bu nedenle viskozite artışı ile yağ içinde soğutkan çözünürlüğünün ters orantılı olduğu kanaatine varılmıştır (Tablo 3.7).

Tablo 3.7 Yağ-Soğutkan Çiftleri İçin Viskozite Değişiminin Buhar Basıncına Etkisi

Sıcaklık (°C)	Karışım Buhar Basıncı (bar)			
	Mineral Yağ-1 - R600a	Mineral Yağ-2 - R600a	POE-1 - R134a	POE-1 - R134a
40	1.12	1.25	1.40	1.47
	2.02	1.97	2.74	2.86
60	1.86	1.92	2.15	2.24
	3.08	3.15	4.18	4.37
80	2.60	2.69	2.94	3.12
	4.42	4.59	5.82	6.20

Benzer viskozite sınıfına sahip Mineral Yağ-1 ile POE-1 (10 cSt sınıfı) ve Mineral-Yağ-2 ile POE-2 (20 cSt sınıfı) yağları karşılaştırıldığında mineral yağda sıcaklık ve soğutkan artışı neticesindeki viskozite azalışı daha belirgin olmaktadır. Bu ilişki Tablo 3.8’de görülmektedir.

Tablo 3.8 Yağ-Soğutkan Çiftlerinde Yağ içinde Soğutkan Çözünürlüğü ve Sıcaklığın Karışım Viskozitesine Etkisi

Sıcaklık (°C)	Mineral Yağ-1 - R600a		POE-1 - R134a	
	Yağ İçinde Soğutkan Çözünürlüğü (Ağr. %'si)	Karışım Viskozitesi (cSt)	Yağ İçinde Soğutkan Çözünürlüğü (Ağr. %'si)	Karışım Viskozitesi (cSt)
40	0.00	9.62	0.00	10.36
	4.73	5.52	4.52	8.64
	9.66	4.00	9.18	7.46
60	0.00	5.29	0.00	6.34
	4.49	3.22	4.11	5.48
	9.34	2.70	8.40	4.63
80	0.00	3.28	0.00	4.13
	4.49	2.45	4.11	3.65
	9.34	1.97	8.40	3.21

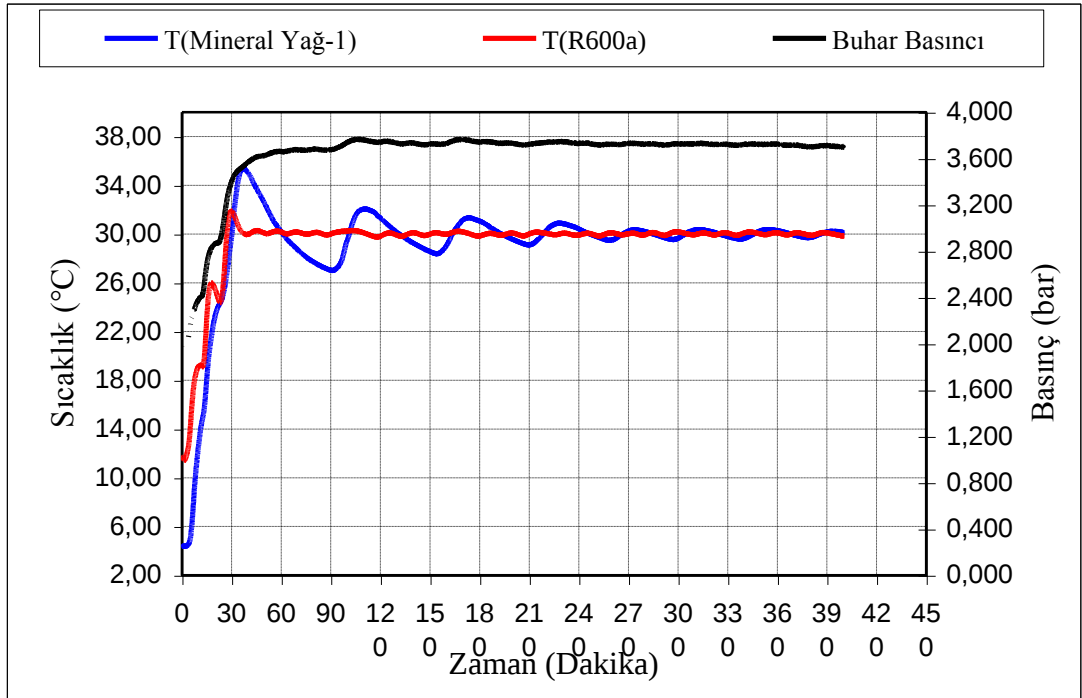
Tüm çiftler için deney sonuçları kullanılarak çalışma şartları (sıcaklık-basınç) bilinen bir kompresör için çözünürlük ve viskozite değerleri kolaylıkla tespit edilebilmektedir. Piyasada buzdolaplarında kullanılan bir hermetik pistonlu kompresörde çalışma sırasında yağ sıcaklığı yaklaşık 65°C, kompresör hazne içi basıncı ise 0.62 bar'dır. Örnek olarak Mineral Yağ-1 – R600a çifti için bu çalışma şartlarında değişen sıcaklıklarda buhar basıncı-yağ içinde soğutkan çözünürlüğü sonuçları kullanılarak yağ içinde çözünen soğutkan miktarı yaklaşık % 1.25 (Ağr. %'si) olmaktadır. Bulunan çözünürlük değeri ve kompresör çalışma sıcaklığı; değişen sıcaklıklarda yağ içinde soğutkan çözünürlüğü-karışım viskozitesi sonuçları ile birlikte kullanıldığında karışımın viskozitesi yaklaşık 4.5 cSt bulunmaktadır. Bu örnekte görülebildiği gibi çalışma şartları bilinen bir kompresör modeli için karışım viskozitesi ve soğutkan çözünürlüğü değerleri bu çalışmada anlatılan deneysel yöntemle belirlenebilmektedir. Özellikle karışım viskozitesi değeri bilindiğinde; kompresör yatakları üzerinde oluşan yağ filminin yük taşıma kapasitesi belirlenerek uygun yatak tasarımları ve yatak malzemesi seçimi çalışmalarında kullanılabilmektedir.

3.5.4. Yağ-Soğutkan Karışımlarında Durma Anı Basıncının Çözünürlüğe ve Viskoziteye Etkisinin İncelenmesi

Kompresör çalışırken soğutkan ve yağ, hareketli parçalar nedeniyle etkin bir şekilde karışmakta, durma anında ise bu karıştırma etkisi görülmemektedir. Satışa arz edilem kompresör modellerinde yağ-soğutkan karışımı sıcaklığı ve kompresör haznesi içi basıncı değişebilmektedir. Örneğin R600a soğutkanı ile çalışan bir kompresör moelinde yağ-soğutkan karışımı sıcaklığı 65°C, kompresör haznesi içi basıncı (yağ-soğutkan karışımı buhar basıncı) ise 0.62 bar olmaktadır. Kompresör durduğunda sıcaklık uzun bir süre yaklaşık aynı değerde kalırken, basınç ise 2.5 bar seviyesine çıkmaktadır.

Basınç artışı ve karıştırma etkisinin yağ-soğutkan karışımlarında yağ içinde soğutkan çözünürlüğü ve karışım viskozitesi üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla bu bölümdeki deneyler yürütülmüş ve ilgili diğer deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Deneylerde sisteme yağ ile birlikte şarj edilen soğutkanın karıştırma işlemi olmaksızın, basınç değeri değişimi seçilen 6.5 saat süre değeri için ölçülmüştür. Soğutkan basıncının zamana bağlı olarak değişimi Şekil 3.25'te görülmektedir. Bu

sonuçlar örnek bir kıyaslama yapmak amacı ile, seçilen Mineral Yağ-1 - R600a çifti değerleri ile karşılaştırılmıştır. Mineral Yağ-1 - R600a çifti için; basınç 2.5 bar'a çıktığında, yağ içinde çözünen soğutkan miktarının yaklaşık %6.2 olması gerekmektedir (Bkz. Şekil 3.17). Ancak kompresör durma anında herhangi bir karıştırma etkisinin bulunmaması, basınç yükselmesi etkisiyle yağ içinde çözünen soğutkan miktarında bir artışa neden olamamaktadır. Şekil 3.25'te verilen grafik incelendiğinde; 6.5 saatlik deney süresince soğutkan basıncında bir düşüş gerçekleşmemiş ve şarj sonrası ulaştığı değeri korumuştur. Soğutkan basıncında düşüşün olmaması yağ içinde çözünmenin olmadığını göstermektedir. Yağ içinde soğutkan çözünmesi durumunda buhar fazındaki soğutkan miktarı azalacağından, basınç düşüşü gözlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle deneyde basınç düşüşünün olmaması; karıştırma etkisinin bulunmadığı kompresör durma anında, çalışma anına göre daha yüksek basıncın oluşmasına karşın yağ içinde soğutkan çözünmeyeceğini göstermektedir.



Şekil 3.25 Yağ-Soğutkan Karışımında Zamana Bağlı Olarak Buhar Basıncının Değişimi (Karıştırma Yok)

4. MODELLEME ÇALIŞMASI

Bu bölümde Mineral Yağ–R600a ve POE-R134 çiftleri için soğutkan çözünürlüğü ve karışım viskozitesi bilgilerinin literatürde verilen modelleme yöntemleri ile hesaplanması gerçekleştirilmektedir. İncelenen yağ-soğutkan çiftlerinde soğutkan çözünürlüğü değerleri Wilson eşitliği ile, karışım viskozitesi ise literatürde incelenen çalışmalar arasından seçilen bir eşitlik ile hesaplanmıştır. Çözünürlük hesaplamasında kullanılan Wilson eşitliği soğutkan-yağ karışımlarının modellenmesinde en etkili teorilerden biri olan yerel bileşim modelleri arasındaki temel eşitlik olması ve yüksek modelleme performansı nedeniyle seçilmiştir [19, 25]. Wilson eşitliği ve viskozite modeli ile hesaplanan değerler deney sonuçları ile karşılaştırılarak, kullanılan bu modellerin hata oranları belirlenmiştir. Soğutkan çözünürlüğü ve karışım viskozitesi değerlerinin hesaplanabilmesi amacıyla Wilson eşitliği ve viskozite eşitliği üzerinde yapılan düzenlemeler, belirlenen ampirik katsayılar, elde edilen sonuçlar ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılma verileri sunulmaktadır.

4.1. Wilson Eşitliği ile Yağdaki Soğutkan Çözünürlüğünün Modellenmesi

(2.31) no’lu Wilson Eşitliği ve (2.23) no’lu aktivite katsayısı ifadeleri birleştirildiğinde aşağıdaki eşitlik türetilmektedir.

$$\ln\left(\frac{y_i P \bar{\Phi}_i}{x_i P_{i,s} \bar{\Phi}_{i,s} P_e}\right) = -\ln(x_1 + x_2 A_{12}) + x_2 \left[\frac{A_{12}}{x_1 + x_2 A_{12}} - \frac{A_{21}}{x_2 + x_1 A_{21}} \right] \quad (4.1)$$

Yağ buhar basıncı çalışma sıcaklıklarında çok düşük olduğundan ihmal edilmiştir. Böylelikle $y_i=1$ olacaktır [19]. Ayrıca;

$$\begin{aligned} x_1 &= x_{R600a}, x_2 = x_{yağ} \\ x_{R600a} + x_{yağ} &= 1 \end{aligned} \quad (4.2)$$

kabulleri ile (4.1) no’lu eşitlik tekrar düzenlenirse $x_{R600a} = x_R$ (soğutkan mol fraksiyonu) aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanabilmektedir:

$$x_R = \frac{P_{mix} \bar{\Phi}_R}{P_{R,s} \cdot \bar{\Phi}_{R,s} \cdot Pe \cdot \exp \left[-\ln(x_R + (1-x_R)A_{12}) + (1-x_R) \left[\frac{A_{12}}{x_1 + (1-x_R)A_{12}} - \frac{A_{21}}{(1-x_R) + x_1A_{21}} \right] \right]} \quad (4.3)$$

$$A_{12} = \frac{v_2}{v_1} \exp \left(\frac{-a_{12}}{RT} \right), A_{21} = \frac{v_1}{v_2} \exp \left(\frac{-a_{21}}{RT} \right) \quad (4.4)$$

Soğutkan çözünürlüğünün doğru bir şekilde hesaplanabilmesi için a_{12} ve a_{21} katsayılarının deneysel veriler yardımıyla belirlenmesi gerekmektedir. Eşitlikteki $\bar{\Phi}_R$ ve $\bar{\Phi}_{R,s}$ (fugasite katsayıları) karışım bilgileri ve soğutkan doygunluk bilgileri için (2.14) no'lu eşitlikten, Pe (Poynting Etkisi) ise (2.18) no'lu eşitlikten hesaplanmaktadır. Tüm parametreler (4.3) no'lu eşitlik üzerine yerleştirildikten sonra soğutkan mol fraksiyonu (x_R) iterasyon yapılarak bulunmaktadır. Karışım içindeki soğutkanın ağırlıkça %'si (w_R) ise aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$w_R = \frac{M_R \cdot x_R}{M_R \cdot x_R + M_{YAG} \cdot (1 - x_R)} \quad (4.5)$$

Wilson eşitliği deneysel sonuçlara göre belirlenen iki katsayı içermektedir. Bu katsayılar a_{12} ve a_{21} (4.4) literatürde birer sabit sayı olarak hesaplanmaktadır [19]. Ancak bu katsayılar sabit sayı şeklinde hesaplandığında sonuç hassasiyeti yeterli görülmediğinden, sıcaklık ve çözünürlüğe bağlı birer fonksiyon halinde belirlenmiştir. Mineral Yağ-R600a çiftleri için belirlenen katsayılar aşağıda verilmektedir:

$$a_{12} = a \left(\frac{T(^{\circ}C)}{10} \right)^3 - b \left(\frac{T(^{\circ}C)}{10} \right)^2 + c \left(\frac{T(^{\circ}C)}{10} \right) - d \quad (4.6)$$

$$a_{21} = -(kx_R) \left(\frac{T(^{\circ}C)}{10} \right) + m + \left(\frac{x_R}{2} \right) \quad (4.7)$$

POE-R134a çiftleri için belirlenen katsayılar ise aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$a_{12} = -(ex_R) \left(\frac{T(^{\circ}C)}{10} \right) + n \quad (4.8)$$

$$a_{21} = -(kx_R) \left(\frac{T(^{\circ}C)}{10} \right) + m + \left(\frac{x_R}{2} \right) \quad (4.7)$$

POE-R134a çiftleri ile Mineral Yağ-R600a çiftleri için belirlene a_{21} katsayısı aynıdır. Katsayı ifadelerinde yer alan a, b, c, d, e, k, m ve n sabit sayıdır.

Wilson Eşitliği katsayıları her bir farklı yağ-soğutkan çifti için tekrar hesaplanmalıdır. Bir çift için hesaplanan katsayılar o çifte ait farklı özellikteki yağlarda kullanılabilmektedir [19]. Bu nedenle Mineral Yağ-R600a çiftleri için kullanılacak katsayıların belirlenmesinde Mineral Yağ-1 – R600a ölçüm sonuçları kullanılmış, belirlenen optimum katsayılar Mineral Yağ-1 – R600a ve Mineral Yağ-2 – R600a çiftlerinin yağdaki soğutkan çözünürlüğü bilgilerinin hesaplanmasında kullanılmıştır. Katsayılar fonksiyon haline getirilirken; ilk olarak sabit sayı olarak belirlenmiş, daha sonra bir katsayı sabit sayı olarak tutulurken diğer katsayı deneysel verilere en yakın sonucu verecek şekilde bir fonksiyon olarak tanımlanmıştır. Daha sonra diğer katsayı da deneysel sonuçlara en yakın sonucu verecek şekilde fonksiyon olarak tanımlanmıştır. Aynı yaklaşım POE-R134a çiftleri için kullanılacak katsayıların belirlenmesinde de kullanılmıştır.

Katsayıların belirlenmesinden sonra; Mineral Yağ-1 – R600a, Mineral Yağ-2 – R600a, POE-1 – R134a ve POE-2 – R134a çiftleri için deneysel çalışmada kullanılan sıcaklık değerleri ve ölçülen buhar basıncı değerleri kullanılarak yağdaki soğutkan çözünürlüğü değerleri Wilson eşitliği ile hesaplanmıştır. Hesaplanan sonuçlar ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılması Mineral Yağ-1 – R600a çifti için Tablo 4.1, Mineral Yağ-2 – R600a çifti için Tablo 4.2, POE-1 – R134a çifti için Tablo 4.3 ve POE-2 – R134a çifti için Tablo 4.4'te verilmiştir. Tablolardaki yağdaki soğutkan çözünürlüğü değerleri ağırlık %'si olarak verilmiştir.

Tablo 4.1'de verilen Mineral Yağ-1 – R600a çifti için Wilson eşitliği ile hesaplanan yağdaki soğutkan çözünürlüğü değerleri ile deneysel değerler arasındaki en büyük fark % 13.4, en küçük fark % 0.4 olmuştur. Ortalama fark ise % 5.3 değerindedir. Tablo 4.2'de görülen Mineral Yağ-2 – R600a çiftinde ise Wilson eşitliği ile hesaplanan yağdaki soğutkan çözünürlüğü değerleri ile deneysel değerler arasındaki en büyük fark % 16.8, en küçük fark % 1.8 olmuştur. Ortalama fark ise % 8.0 değerindedir.

Tablo 4.1 MineralYağ-1 – R600a Çifti İçin Wilson Eşitliği İle Hesaplanan Yağdaki Soğutkan Çözünürlüğü ve Deneysel Sonuçlarla Karşılaştırılması

Sıcaklık (°C)	Denge Basıncı (bar)	Soğutkan Çözünürlüğü		Fark (%)
		Wilson Eşitliği	Deneysel	
40	0.00	0.00	0.00	-
	1.12	4.56	4.73	3.6
	2.02	9.7	9.66	0.4
50	0.00	0.00	0.00	-
	1.50	4.99	4.66	7.1
	2.51	9.94	9.59	3.6
60	0.00	0.00	0.00	-
	1.86	5.16	4.6	12.2
	3.08	9.63	9.51	1.3
70	0.00	0.00	0.00	-
	2.22	5.15	4.54	13.4
	3.70	9.48	9.43	0.5
80	0.00	0.00	0.00	-
	2.60	4.92	4.49	9.6
	4.42	9.21	9.34	1.4

Tablo 4.2 MineralYağ-2 – R600a Çifti İçin Wilson Eşitliği İle Hesaplanan Yağdaki Soğutkan Çözünürlüğü ve Deneysel Sonuçlarla Karşılaştırılması

Sıcaklık (°C)	Denge Basıncı (bar)	Soğutkan Çözünürlüğü		Fark (%)
		Wilson Eşitliği	Deneysel	
40	0.00	0.00	0.00	-
	1.25	5.12	4.76	7.6
	1.97	9.36	9.68	3.3
50	0.00	0.00	0.00	-
	1.56	5.23	4.71	11.0
	2.54	9.77	9.6	1.8
60	0.00	0.00	0.00	-
	1.92	5.36	4.65	15.3
	3.15	9.91	9.52	4.1
70	0.00	0.00	0.00	-
	2.30	5.36	4.59	16.8
	3.82	9.86	9.43	4.6
80	0.00	0.00	0.00	-
	2.69	5.12	4.56	12.3
	4.59	9.65	9.33	3.4

Tablo 4.3'te verilen POE-1 – R134a çifti için Wilson eşitliği ile hesaplanan yağdaki soğutkan çözünürlüğü değerleri ile deneysel değerler arasındaki en büyük fark % 7.9, en küçük fark % 0.4 olmuştur. Ortalama fark ise % 2.9 değerindedir. Tablo 4.4'teki

POE-2 – R134a çiftinde ise Wilson eşitliği ile hesaplanan yağdaki soğutkan çözünürlüğü değerleri ile deneysel değerler arasındaki en büyük fark % 13.3, en küçük fark % 1.1 olmuştur. Ortalama fark ise % 4.4 değerindedir.

Tablo 4.3 POE-1 – R134a Çifti İçin Wilson Eşitliği İle Hesaplanan Yağdaki Soğutkan Çözünürlüğü ve Deneysel Sonuçlarla Karşılaştırılması

Sıcaklık (°C)	Denge Basıncı (bar)	Soğutkan Çözünürlüğü		Fark (%)
		Wilson Eşitliği	Deneysel	
40	0.00	0.00	0.00	-
	1.40	4.57	4.52	1.1
	2.74	9.22	9.18	0.4
50	0.00	0.00	0.00	-
	1.78	4.47	4.41	1.4
	3.42	8.27	8.98	7.9
60	0.00	0.00	0.00	-
	2.15	4.45	4.30	3.5
	4.18	8.44	8.78	3.9
70	0.00	0.00	0.00	-
	2.58	4.37	4.19	4.3
	5.00	8.65	8.60	0.6
80	0.00	0.00	0.00	-
	2.94	4.02	4.11	2.2
	5.82	8.69	8.40	3.5

Tablo 4.4 POE-2 – R134a Çifti İçin Wilson Eşitliği İle Hesaplanan Yağdaki Soğutkan Çözünürlüğü ve Deneysel Sonuçlarla Karşılaştırılması

Sıcaklık (°C)	Denge Basıncı (bar)	Soğutkan Çözünürlüğü		Fark (%)
		Wilson Eşitliği	Deneysel	
40	0.00	0.00	0.00	-
	1.47	4.62	4.52	2.2
	2.86	9.56	9.18	4.1
50	0.00	0.00	0.00	-
	1.83	4.46	4.41	1.1
	3.56	8.76	8.98	2.4
60	0.00	0.00	0.00	-
	2.24	4.50	4.30	4.7
	4.37	8.88	8.78	1.1
70	0.00	0.00	0.00	-
	2.67	4.41	4.19	5.3
	5.27	9.30	8.60	8.1
80	0.00	0.00	0.00	-
	3.12	4.16	4.11	1.2
	6.20	9.52	8.40	13.3

4.2.Viskozite Eşitliği ile Karışım Viskozitesinin Modellenmesi

(2.33) no'lu viskozite eşitliğinde yağ fraksiyonu, soğutkan fraksiyonu cinsinden yazılarak tekrar düzenlendiğinde aşağıdaki eşitlik yazılabilmektedir.

$$\ln \mu_{mix} = \frac{M_R^k x_R}{M_R^k x_R + M_{yağ}^k (1 - x_R)} \ln \mu_R + \frac{M_{yağ}^k (1 - x_R)}{M_R^k x_R + M_{yağ}^k (1 - x_R)} \ln \mu_{yağ} \quad (4.9)$$

Eşitlikte yer alan μ_R ve $\mu_{yağ}$ karışım sıcaklığında bileşenlerin saf haldeki kinematik viskoziteleridir. M_R ve $M_{yağ}$ ise soğutkan ve yağın mol ağırlıklarıdır (R600a:58.122 kg/molkg, R134a:102.03 kg/molkg, Mineral Yağ:350 kg/molkg, POE:600 kg/molkg [16, 19]). k katsayısı deneysel veriler yardımıyla belirlenmektedir.

Mineral Yağ-R600a ve POE-R134a çiftleri için uygun k katsayısı ölçüm sonuçları kullanılarak belirlenmesine rağmen hesaplanan viskozite değeri sıcaklığa bağlı olarak salınmaktadır. Bu salınım düşük sıcaklıklarda (<50°C) viskozite değerinin pozitif, yüksek sıcaklıklarda (>50) negatif yönde farklılaşması şeklinde olmaktadır. Bu nedenle viskozite modeline sıcaklık etkisini gidermek amacıyla bir çarpan eklenmiştir:

$$\ln \mu_{mix} = \left(\sqrt[x]{\frac{T(^{\circ}C)}{y}} \right) \left(\frac{m_R^k x_R}{m_R^k x_R + m_{yağ}^k (1 - x_R)} \ln \mu_R + \frac{m_{yağ}^k (1 - x_R)}{m_R^k x_R + m_{yağ}^k (1 - x_R)} \ln \mu_{yağ} \right) \quad (4.10)$$

Eşitlikte yer alan x ve y birer sabit sayı ve tüm yağ-soğutkan çiftleri için aynıdır.

Mineral Yağ-1 – R600a, Mineral Yağ-2 – R600a, POE-1 – R134a ve POE-2 – R134a çiftleri için viskozite eşitliği ile hesaplanan karışım viskozitesi sonuçları ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılması sırasıyla Tablo 4.5, Tablo 4.6, Tablo 4.7 ve Tablo 4.8'de verilmektedir. Viskozite hesaplamasında deneysel çalışmada kullanılan sıcaklık değerleri ölçülen buhar basınçları kullanılarak hesaplanan Wilson eşitliği çözünürlük sonuçları kullanılmıştır.

Tablo 4.5'te verilen Mineral Yağ-1 – R600a çifti için viskozite eşitliği ile hesaplanan karışım viskozitesi değerleri ile deneysel değerler arasındaki en büyük fark % 10.2, en küçük fark % 0 olmuştur. Ortalama fark ise % 4.7 değerindedir. Tablo 4.6'da yer alan Mineral Yağ-2 – R600a çiftinde ise viskozite eşitliği ile hesaplanan karışım

viskozitesi değerleri ile deneysel değerler arasındaki en büyük fark % 18.2, en küçük fark % 1.6 olmuştur. Ortalama fark ise % 8.8 değerindedir.

Tablo 4.5 Mineral Yağ-1 – R600a Çifti İçin Viskozite Eşitliği İle Hesaplanan Karışım Viskozitesi ve Deneysel Sonuçlarla Karşılaştırılması

Sıcaklık (°C)	Denge Basıncı (bar)	Karışım Viskozitesi (cSt)		Fark (%)
		Viskozite Eşitliği	Deneysel	
40	0.00	9.62	9.62	-
	1.12	6.00	5.52	8.7
	2.02	4.00	4.00	0.0
50	0.00	6.94	6.94	-
	1.50	4.47	4.15	7.7
	2.51	3.17	3.29	3.6
60	0.00	5.29	5.29	-
	1.86	3.55	3.22	10.2
	3.08	2.61	2.70	3.3
70	0.00	4.15	4.15	-
	2.22	2.93	2.81	4.3
	3.70	2.21	2.31	4.3
80	0.00	3.28	3.28	-
	2.60	2.45	2.45	0.0
	4.42	1.88	1.97	4.6

Tablo 4.6 Mineral Yağ-2 – R600a Çifti İçin Viskozite Eşitliği İle Hesaplanan Karışım Viskozitesi ve Deneysel Sonuçlarla Karşılaştırılması

Sıcaklık (°C)	Denge Basıncı (bar)	Karışım Viskozitesi (cSt)		Fark (%)
		Viskozite Eşitliği	Deneysel	
40	0.00	21.09	21.09	-
	1.25	11.36	11.55	1.6
	1.97	7.56	6.53	15.8
50	0.00	15.29	15.29	-
	1.56	8.73	8.48	2.9
	2.54	5.79	5.00	15.8
60	0.00	10.83	10.83	-
	1.92	6.52	6.34	2.8
	3.15	4.41	3.73	18.2
70	0.00	8.21	8.21	-
	2.30	5.21	4.93	5.7
	3.82	3.15	3.30	4.5
80	0.00	6.36	6.36	-
	2.69	4.30	3.97	8.3
	4.59	3.03	2.69	12.6

Tablo 4.5'te verilen POE1 – R134a çifti için viskozite eşitliği ile hesaplanan karışım viskozitesi değerleri ile deneysel değerler arasındaki en büyük fark % 9.9, en küçük fark % 1.9 olmuştur. Ortalama fark ise % 5.2 değerindedir.

Tablo 4.7 POE-1 – R134a Çifti İçin Viskozite Eşitliği İle Hesaplanan Karışım Viskozitesi ve Deneysel Sonuçlarla Karşılaştırılması

Sıcaklık (°C)	Denge Basıncı (bar)	Karışım Viskozitesi (cSt)		Fark (%)
		Viskozite Eşitliği	Deneysel	
40	0.00	10.36	10.36	-
	1.40	8.21	8.64	5.0
	2.74	6.83	7.46	8.4
50	0.00	7.97	7.97	-
	1.78	6.39	7.03	9.1
	3.42	5.37	5.96	9.9
60	0.00	6.34	6.34	-
	2.15	5.28	5.48	3.6
	4.18	4.43	4.63	4.3
70	0.00	5.25	5.25	-
	2.58	4.52	4.40	2.7
	5.00	3.76	3.85	2.3
80	0.00	4.13	4.13	-
	2.94	3.72	3.65	1.9
	5.82	3.06	3.21	4.7

Tablo 4.8 POE-2 – R134a Çifti İçin Viskozite Eşitliği İle Hesaplanan Karışım Viskozitesi ve Deneysel Sonuçlarla Karşılaştırılması

Sıcaklık (°C)	Denge Basıncı (bar)	Karışım Viskozitesi (cSt)		Fark (%)
		Viskozite Eşitliği	Deneysel	
40	0.00	18.76	18.76	-
	1.47	14.47	15.05	3.9
	2.86	11.58	11.79	1.8
50	0.00	13.96	13.96	-
	1.83	10.89	11.85	8.1
	3.56	8.72	9.31	6.3
60	0.00	11.07	11.07	-
	2.24	8.95	9.36	4.4
	4.37	7.18	7.40	3.0
70	0.00	8.54	8.54	-
	2.67	7.17	7.40	3.1
	5.27	5.66	5.90	4.1
80	0.00	7.14	7.14	-
	3.12	6.23	6.02	3.5
	6.20	4.83	4.87	0.8

Tablo 4.7’de verilen POE-2 – R134a çifti için viskozite eşitliği ile hesaplanan karışım viskozitesi değerleri ile deneysel değerler arasındaki en büyük fark % 8.1, en küçük fark % 0.8 olmuştur. Ortalama fark ise % 3.9 değerindedir.

4.3. Mineral Yağ-R600a ve POE-R134a Çifti Modelleme Sonuçlarının Karşılaştırılması

Bu bölümde Mineral Yağ-R600a ve POE-R134a çiftleri için Wilson ve viskozite eşitliği kullanılarak hesaplanan yağdaki soğutkan çözünürlüğü ve karışım viskozitesi değerlerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılmasıyla elde edilen eşitlik performansları değerlendirilmektedir. Deneysel ve teorik olarak çalışılan her bir yağ-soğutkan çifti için eşitliklerle hesaplanan ve deneysel olarak elde edilen sonuçlar arasındaki ortalama fark Tablo 4.9’da verilmektedir.

Tablo 4.9 Yağ-Soğutkan Çiftleri İçin Eşitlik Performansları

Yağ-Soğutkan Çifti	Soğutkan Çözünürlüğü	Karışım Viskozitesi
	Wilson Eşitliği-Deneysel Sonuç Farkı (%)	Viskozite Eşitliği-Deneysel Sonuç Farkı (%)
Mineral Yağ-1 - R600a	5.3	4.7
Mineral Yağ-2 - R600a	8.0	8.8
POE-1 - R134a	2.9	5.2
POE-2 - R134a	4.4	3.9

Tablo 4.9’da görüldüğü üzere deneysel yöntemle ve eşitliklerle hesaplanan sonuçlar arasındaki ortalama fark POE-R134a çiftinde daha küçüktür. Bu nedenle POE-R134a çiftinin özelliklerinin hesaplanmasında Wilson eşitliği ve viskozite modelinin daha iyi performans gösterdiği söylenebilmektedir. Literatürde Wilson eşitliği kullanılarak yapılan çalışmalarda eşitlik sonuçları ile deneysel sonuçların arasında ortalama % 8 fark görülmektedir [19]. Bu nedenle kullanılan eşitliklerin ve belirlenen ampirik katsayıların her iki çift özelliklerinin belirlenmesinde de başarılı sonuç verdiği kanaatine varılmıştır.

Wilson eşitliği ve viskozite eşitliği ampirik katsayıları Mineral Yağ-R600a ve POE-R134a çiftleri için bir kez tanımlanmıştır. Mineral Yağ-1 – R600a çifti ölçüm

sonuçları kullanılarak belirlenen katsayılar; Mineral Yağ-1 – R600a ve Mineral Yağ-2 – R600a çiftlerinde, POE-1 –R134a çifti ölçüm sonuçları kullanılarak belirlenen katsayılar ise; POE-1 –R134a ve POE-2 – R134a çiftlerinde çözünürlük ve viskozite belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Tüm çiftlerde model performansının tatmin edici olması her çift için bir kez katsayı belirlenmesinin yeterli olacağını göstermektedir. Böylelikle farklı özelliklerde mineral yağ ve polyol ester yağ ile çalışılsa dahi (40°C-80°C aralığında) çıkarılan bu katsayılar yardımıyla çözünen soğutkan miktarı ve viskozite değerleri belirlenebilecektir. Geliştirilen bu eşitliklerin kullanılmasıyla; uzun süreli deneylerin yapılmasına ihtiyaç duyulmadan kompresör yağ-soğutkan karışımı özelliklerin belirlenmesi mümkün olabilmektedir.

5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında ev tipi buzdolaplarında kullanılan hermetik soğutma kompresörleri yağ-soğutkan karışımlarında, yağdaki soğutkan çözünürlüğü ve karışım viskozitesi bilgileri deneysel ve teorik yöntemlerle incelenmiştir.

Kompresörlerdeki farklı çalışma şartlarının oluşturulabileceği, kompresör çalışma esnasında oluşan soğutkanın yağ içinde çözünmesi sürecinin izlenebileceği bir deney sistemi tasarlanmış, imalatı, montajı ve işletmeye alınması gerçekleştirilmiştir. Bu deney sistemi ve geliştirilen deneysel çalışma yöntemi ile çeşitli yağ-soğutkan çiftleri için soğutkan çözünürlüğü ve karışım viskozitesi bilgilerinin elde edilmesi mümkün olmaktadır. Deney sistemi ve deneysel çalışma yönteminin kompresör içi yağ-soğutkan karışımları özelliklerinin belirlenmesi için uygun olduğu yapılan kontrol çalışmaları ile görülmüştür. Tasarlanan deney sistemi ile; Türkiye’de yapılamayan, yurtdışında ise sadece birkaç enstitü tarafından bir kompresör yağı için yaklaşık 10,000 Avro bedel karşılığında yapılan yağ-soğutkan karışımı deneyleri yapılabilmektedir. Bu tez çalışması neticesinde geliştirilen deney sistemi ve deneysel çalışma yöntemi Arçelik A.Ş. Araştırma ve Geliştirme laboratuvarlarında aktif olarak kullanılmakta ve Türk sanayisine hizmet vermektedir.

Mineral Yağ-R600a çiftleri ve POE-R134a çiftleri ile gerçekleştirilen deneylerin sonucunda; söz konusu yağ-soğutkan çiftleri için değişen sıcaklıklarda buhar basıncı-yağdaki soğutkan çözünürlüğü ve karışım viskozitesi-yağdaki soğutkan çözünürlüğü ilişkileri elde edilmiştir. Bu bilgilerin kullanılmasıyla farklı çalışma şartlarındaki kompresörler için soğutkan çözünürlüğü ve karışım viskozitesi bilgileri belirlenebilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde; yağdaki soğutkan çözünürlüğü, sıcaklık, buhar basıncı ve karışım viskozitesi kavramlarının birbirleriyle olan ilişkisi de ortaya konulmuştur. Yağdaki soğutkan çözünürlüğü ve karışım viskozitesi sıcaklık artışı ile azalmıştır. Karışım viskozitesi aynı zamanda sıcaklık sabit olduğunda soğutkan çözünürlüğünün artışı ile azalmıştır. Viskozitesi daha yüksek yağların kullanıldığı yağ-soğutkan çiftlerinde soğutkan çözünürlüğü bir miktar daha az olmuştur. Mineral Yağ-R600a çiftlerinde sıcaklık ve soğutkan artışı neticesindeki

viskozite azalışı daha belirgin olurken, POE-R134a çiftlerinde yağ içinde soğutkan çözünürlüğünün daha az olduğu kanaatine varılmıştır. Ayrıca kompresör durma anında çalışma anına göre basınç yükselmesi gözlenmesine rağmen, karıştırma etkisinin olmaması nedeniyle yağ içinde soğutkan çözünmemektedir.

Yağdaki soğutkan çözünürlüğü ve karışım viskozitesi bilgileri teorik yöntemlerle de hesaplanmıştır. Yağdaki soğutkan çözünürlüğünün hesaplanmasında Wilson Eşitliği, karışım viskozitesinin hesaplanmasında ise literatürde yer alan bir eşitlik kullanılmıştır. Eşitliklerin kullanılmasıyla hesaplanan sonuçlar ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında, kullanılan eşitliklerin ve belirlenen ampirik katsayıların çalışılan yağ-soğutkan çiftleri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Mineral Yağ-R600a ve POE-R134a çiftleri için kullanılan eşitlikle için belirlenen deneysel katsayılar farklı özelliklerdeki Mineral Yağ-R600a ve POE-R134a çiftlerinde de kullanılabilmekte ve böylelikle uzun süreli deneyler yapılmadan bu yağ-soğutkan çiftleri için, soğutkan çözünürlüğü ile karışım viskozitesi bilgilerinin elde edilmesi mümkün olmaktadır. Modelleme çalışması ile, literatürde yer alan eşitliklerde R600a soğutkanı için kullanılabilecek ampirik katsayılar ilk kez tanımlanmış ve literatür ile endüstriyel uygulamalar için ortaya konmuştur.

6. KAYNAKLAR

- [1] **Abdik, B.**, 2003. Soğutucu Akışkan Kompresörlerinde Oluşan Yatak Kayıplarının İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [2] www.warmair.com/html/refrigeration_cycle.htm
- [3] **Arçelik A.Ş.**, şirket içi intranet sayfası.
- [4] **Ünal, B. ve Kerpiççi, H.**, 2003. Kompresör Yağ Pompası Verimine Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi ve Yağ Pompası için CFD Analizi, Arçelik A.Ş. ArGe Araştırma Raporu, İstanbul.
- [5] **Aydın, C.**, 1998. AE 148 Kompresöründe yatak Kayıplarının Belirlenmesi Amaçlı Temel Hesaplar, Arçelik A.Ş. ArGe Araştırma Raporu, İstanbul.
- [6] **Booser, E.R.**, 1997. Tribology Data Handbook, CRC Pres, New York.
- [7] **ASM International Handbook Committee**, 1992. ASM Handbook, Volume 18: Friction, Lubrication and Wear Technology, ASM International, USA.
- [8] **Kurt, A.K., Özcan, A. ve Abdik, B.**, 2003. MTH-75 Bazlı Prototip Kompresörlerde Diril Yöntemi & Artesis Yöntemiyle Ölçülen Mekanik Kayıpların Karşılaştırılması, Arçelik A.Ş. ArGe Araştırma Raporu, İstanbul.
- [9] **Gibb, P.T., Randles, S., Boyde, S., Corr, S. And Takahashi, I.**, 2000. The Effect of Lubricant Physical Properties on Energy Consumption of Refrigeration Compressors, *2000 International Compressor Engineering Conference at Purdue*, USA, July 25-28.
- [10] **Yüzer, S., Kerpiççi, H., Ünal, B.**, 2004. Yağ-Soğutkan Etkileşim Deney Düzeneği ile Yapılan Ön Çalışmalar, Arçelik A.Ş. ArGe Araştırma Raporu, İstanbul.
- [11] **Salıhoğlu, S.**, 1995. Sealed Tube Deneyleri, Arçelik A.Ş. ArGe Araştırma Raporu, İstanbul.
- [12] **Klamann, D.**, 1984. Lubricants and Related Products, Verlag Chemie, Germany.
- [13] **Özkol, N.**, 1999. Uygulamalı Soğutma Tekniği, Makine Mühendisleri Odası Yayını, Ankara
- [14] <http://www.videolife.kiev.ua/eng/refrigerants/alternative.html>
- [15] http://cwx.prenhall.com/bookbind/pubbooks/hillchem3/medialib/media_portfolio/02.html
- [16] <http://www.hychill.com/tech/>
- [17] www.frank-dieterle.de/phd/4_5_1.html

- [18] **Lemmon, E.W., McLinden, M.O. and Huber, L.,** 2002. NIST Standart Reference Database 23, Version 7.0 Physical and Chemical Properties Division, National Institute of Standards and Technology USA.
- [19] **Jacobi, A. M. and Martz, W. L.,** 1994. Refrigerant-Oil Mixtures and Local Composition Modeling, University of Illinois, ACRC Technical Report, USA.
- [20] **Meriçboyu, A.,** 2001. Termodinamik-2 Ders Notları, İ.T.Ü. Kimya Mühendisliği Bölümü, İstanbul.
- [21] <http://wine1.sb.fsu.edu/chm1046/notes/Thermody/Gibbs/Gibbs.htm>
- [22] **Grebner, J.J. and Crawford, R.R.,** 1993. Measurement of Pressure-Temperature-Concentration Relations for Mixtures of R-12/Mineral Oil and R-134a/Synthetic Oil, *ASHRAE Transactions*, Vol:99-1, 387-396.
- [23] **Tesser, R.,** 1999. Description of the Vapor-Liquid Equilibrium in Binary Refrigerant/Lubricating Oil Systems by Means of an Extended Flory-Huggins Model, *Journal of Fluorine Chemistry*, 99, 29-36.
- [24] **Tesser, R.,** 2003. Vapor-Liquid Equilibrium Measurements for Binary Mixtures of R32, R134a, R134a and R125 with a Perfluoropolyether Lubricant, *Journal of Fluorine Chemistry*, 121, 15-22.
- [25] **Yokozeki, A.M.,** 1994. Solubility and Viscosity of Hydrofluorocarbon / Alkylbenzene Oil Mixtures, 1994 *International Compressor Engineering Conference at Purdue*, Vol-2, 677-682.
- [26] **Hewitt, N.J., McMullan, J.T. and Murphy, N.E.,** 1991. A Solubility Equation for R22-Oil Mixtures, *International Journal of Energy Research*, VOL. 15, 763-768.
- [27] **Van Galen, N.A., Pate, M.B. and Zoz, S.C.,** 1990. The Measurement of Solubility and Viscosity of Oil/Refrigerant Mixtures At High Pressures and Temperatures: Test Facility And Initial Results for R22/Naphthenic Oil Mixtures, *ASHRAE Transactions*, Vol:96 (2), 183-190.
- [28] **Viking Pump USA,** Viking Spur Gear Pumps, Ürün Kataloğu.
- [29] **Cambridge Applied Systems,** 1998. Viscometer User Manual.

ÖZGEÇMİŞ

Nevzat Serkan YÜZER, 1980 yılında İstanbul'un Bakırköy ilçesinde doğdu. Ortaöğretimini 1998 yılında Maçka Akif Tuncel Anadolu Teknik Lisesi-Bilgisayar bölümünden mezun olarak tamamladı. 1998 yılında girdiği İTÜ Kimya-Metalürji Fakültesi'nden 2003 senesinde Kimya Mühendisi olarak mezun oldu ve aynı yıl İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. Halen İTÜ Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisans öğrencisi olup, "Endüstride Uygulama Destekli Tez Programı" kapsamında Arçelik A.Ş. Araştırma ve Geliştirme Direktörlüğü'nde çalışmalarını sürdürmektedir.